

## ***Informe del proyecto ejecutivo***

### **Contenido**

|                                                          |    |
|----------------------------------------------------------|----|
| 1. Resumen ejecutivo .....                               | 6  |
| 2. Planeación.....                                       | 10 |
| 2.1. Antecedentes .....                                  | 10 |
| 2.1.1. Esquema de abastecimiento actual del AMG.....     | 10 |
| 2.2. Marco físico del AMG .....                          | 16 |
| 2.2.1. Ubicación geográfica .....                        | 16 |
| 2.2.2. Población.....                                    | 18 |
| 2.2.3. Clima .....                                       | 20 |
| 2.2.4. Litología.....                                    | 22 |
| 2.2.5. Uso de suelo y vegetación .....                   | 24 |
| 2.2.6. Hidrografía.....                                  | 27 |
| 2.2.7. Relieve .....                                     | 35 |
| 2.2.8. Análisis de Pendientes .....                      | 36 |
| 2.2.9 Huella de Ciudad.....                              | 37 |
| 2.2.10 Escenario Tendencial de Crecimiento.....          | 39 |
| 2.2.11 Utilización de Suelo y Zonificación Primaria..... | 41 |
| 2.2.12 Utilización de Suelo y Macro perspectiva .....    | 43 |
| 2.2.13 Vialidades y Conectividad Urbana.....             | 45 |
| 2.2.14. Aspectos sociales y económicos.....              | 53 |
| 3. Propuesta de solución.....                            | 64 |
| 4. Estudios básicos .....                                | 67 |
| 4.1. Datos básicos .....                                 | 67 |
| 4.2. Estudios Topográficos .....                         | 70 |
| 4.3. Estudios de Calidad del agua .....                  | 79 |
| 4.4. Estudios de Geotecnia.....                          | 86 |
| 4.4.1 Geología.....                                      | 86 |
| 4.4.2 Sismicidad .....                                   | 87 |
| 4.4.3 Trabajos de Investigación de Campo .....           | 88 |
| 4.4.4 Estratigrafía .....                                | 93 |

|                                                                                  |     |
|----------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.4.5 Clasificación de los Materiales para Excavación .....                      | 96  |
| 4.4.6 Ensayos de Laboratorio.....                                                | 97  |
| 4.4.7 Recomendaciones y Procedimiento Constructivo Línea de Conducción .....     | 103 |
| 4.4.8 Bancos de Préstamo .....                                                   | 109 |
| 5. Memoria descriptiva y de cálculo .....                                        | 113 |
| 5.1. Diseño conceptual .....                                                     | 113 |
| 5.2. Diseño del Acueducto .....                                                  | 115 |
| 5.2.1. Descripción de las condiciones topográficas.....                          | 115 |
| 5.2.2 Diámetro económico Línea de Impulsión .....                                | 118 |
| 5.2.3 Diámetro económico Línea de Gravedad.....                                  | 127 |
| 5.2.4. Alternativas para la Selección de Equipo de Bombeo.....                   | 128 |
| 5.2.5. Criterios de Diseño .....                                                 | 140 |
| 5.2.6. Propiedades de la tubería .....                                           | 141 |
| 5.2.7. Diseño en flujo permanente.....                                           | 143 |
| 5.2.8. Modelación del fenómeno transitorio.....                                  | 159 |
| 5.2.9. Ubicación de válvulas de admisión y expulsión de aire.....                | 179 |
| 5.2.10 Atraques .....                                                            | 181 |
| 5.2.11 Cruces de Carreteras .....                                                | 185 |
| 5.2.12 Cruces de Cauces Federales .....                                          | 186 |
| 5.2.13 Protección catódica .....                                                 | 201 |
| 6. Catálogo de conceptos, análisis de precios unitarios y presupuesto base ..... | 206 |
| 7. Especificaciones de obra.....                                                 | 208 |
| 8. Calendario de ejecución y programación .....                                  | 208 |
| 9. Manuales de operación y mantenimiento .....                                   | 208 |

## Índice de tablas

|                                                                                                                          |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabla 1.1 Cuadro de coordenadas de los componentes principales del acueducto .....                                       | 8   |
| Tabla 2.1 Fuentes de abastecimiento actuales del AMG Fuente: CEA Jalisco .....                                           | 10  |
| Tabla 2.2 Población servida por SIAPA y por Fuente de Abastecimiento.....                                                | 15  |
| Tabla 2.3 Superficie total por áreas del AMG .....                                                                       | 18  |
| Tabla 2.4 Población, Superficies y Densidades del AMG .....                                                              | 19  |
| Tabla 2.5 Proyecciones de Población del AMG Fuente; CONAPO 2024 .....                                                    | 19  |
| Tabla 2.6 Unidades Climáticas en el AMG.....                                                                             | 21  |
| Tabla 2.7 Clasificación del tipo de roca del AMG.....                                                                    | 22  |
| Tabla 2.8 Uso de suelo del AMG .....                                                                                     | 27  |
| Tabla 2.9 Hidrografía en el AMG.....                                                                                     | 31  |
| Tabla 2.10 Disponibilidad de Agua Superficial en el AMG .....                                                            | 32  |
| Tabla 2.11 Disponibilidad de Agua Subterránea en el AMG .....                                                            | 35  |
| Tabla 2.12 Análisis de Pendientes en el AMG .....                                                                        | 37  |
| Tabla 2.13 Superficies Urbanizadas por el Crecimiento del AMG .....                                                      | 38  |
| Tabla 2.14 Escenario tendencial de crecimiento.....                                                                      | 40  |
| Tabla 2.15 Superficies de Zonificación Primaria del AMG .....                                                            | 42  |
| Tabla 2.16 Cuantificación en los usos de suelo zonificación secundaria.....                                              | 45  |
| Tabla 2.17 Longitud de vialidades primarias y regionales en el AMG (Fuente: POTMet, IMAPLAN) .....                       | 46  |
| Tabla 2.18 Cobertura de transporte público en el AMG (fuente: POTMet, IMEPLAN).....                                      | 52  |
| Tabla 2.19 Variaciones de la Producción Bruta Total del Área Metropolitana de Guadalajara por municipio, 2008-2018 ..... | 62  |
| Tabla 2.20 Producción Bruta Total por sector de actividad económica en los municipios centrales .....                    | 63  |
| Tabla 4.1 Población Censo 2020 INEGI .....                                                                               | 67  |
| Tabla 4.2 Proyección de Población del AMG (Fuente: Elaboración Propia) .....                                             | 67  |
| Tabla 4.3 Demanda de agua potable del AMG .....                                                                          | 68  |
| Tabla 4.4 Datos de proyecto .....                                                                                        | 69  |
| Tabla 4.5 Bancos de nivel y Puntos GPS .....                                                                             | 77  |
| Tabla 4.6 Parámetros de calidad del agua de las muestras tomadas en el Canal de Llamada.....                             | 81  |
| Tabla 4.7 Parámetros de calidad del agua de las muestras tomadas en el Tanque de Cambio de Régimen .....                 | 82  |
| Tabla 4.8 Parámetros de calidad del agua de las muestras tomadas en el Tanque de Entrega .....                           | 82  |
| Tabla 4.9 Índice de Langelier Canal de Llamada .....                                                                     | 84  |
| Tabla 4.10 Índice de Langelier Tanque de Cambio de Régimen .....                                                         | 84  |
| Tabla 4.11 Índice de Langelier Tanque de Entrega .....                                                                   | 84  |
| Tabla 4.12 Valores Promedio Índice de Langelier .....                                                                    | 85  |
| Tabla 4.13 Ubicación y Profundidades de Sondeos SPT .....                                                                | 90  |
| Tabla 4.14 Ubicación y Profundidades de Sondeos PCA .....                                                                | 92  |
| Tabla 4.15 Propiedades de Materiales de los SPT .....                                                                    | 95  |
| Tabla 4.16 Propiedades de Materiales de los PCA.....                                                                     | 96  |
| Tabla 4.17 Resultados de Gravedad específica de las partículas sólidas. ....                                             | 97  |
| Tabla 4.18. Resultados de contenido de cloruros y sulfatos. ....                                                         | 98  |
| Tabla 4.19. Resultados de pH del suelo .....                                                                             | 99  |
| Tabla 4.20. Resultados de triaxiales (U.U.).....                                                                         | 100 |
| Tabla 4.21. Resultados de triaxiales (C.U.).....                                                                         | 100 |
| Tabla 4.22. Resultado de Coeficiente Volumétrico de Abundamiento en sondeos SPT.....                                     | 101 |
| Tabla 4.23. Resultado de Coeficiente Volumétrico de Abundamiento en sondeos PCA. ....                                    | 102 |

|                                                                                                                  |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabla 4.24 Ubicación por Tipo de Mejoramiento a lo largo del Acueducto .....                                     | 107 |
| Tabla 5.1 Aplicación de fórmulas para el diámetro tentativo .....                                                | 118 |
| Tabla 5.2 Cálculo de Diámetro Económico .....                                                                    | 119 |
| Tabla 5.3 Características Particulares de las tuberías analizadas .....                                          | 119 |
| Tabla 5.4 Características de las tuberías analizadas .....                                                       | 120 |
| Tabla 5.5 Ventajas y desventajas de los diferentes materiales .....                                              | 121 |
| Tabla 5.6 Análisis de Costos de Inversión .....                                                                  | 123 |
| Tabla 5.7 Costo Consumo Energía para Bombeo de 24 Horas .....                                                    | 124 |
| Tabla 5.8 Costo Consumo Energía para Bombeo de 24 Horas .....                                                    | 125 |
| Tabla 5.9 Análisis de Costos de Operación para 24 horas de bombeo .....                                          | 125 |
| Tabla 5.10 Análisis de Costos de Operación para 18 horas de bombeo .....                                         | 126 |
| Tabla 5.11 Análisis de Costos Anuales para 24 horas de bombeo .....                                              | 126 |
| Tabla 5.12 Análisis de Costos Anuales para 18 horas de bombeo .....                                              | 126 |
| Tabla 5.13 Cálculo de Diámetro Económico Tramo Gravedad .....                                                    | 128 |
| Tabla 5.14 Datos de Cargas dinámicas totales para Selección de Equipo de Bombeo .....                            | 130 |
| Tabla 5.15 Resumen de Evaluación Cuantitativa de Equipos de Bombeo .....                                         | 136 |
| Tabla 5.16 Matriz Técnica Comparativa Equipos de Bombeo .....                                                    | 136 |
| Tabla 5.17 Datos técnicos de los Equipos de Bombeo .....                                                         | 139 |
| Tabla 5.18 Costos de Inversión y Operación Equipos de Bombeo .....                                               | 139 |
| Tabla 5.19 Velocidades permisibles (MAPAS, 2015) .....                                                           | 141 |
| Tabla 5.20 Propiedades mecánicas de la tubería de acero propuesta .....                                          | 142 |
| Tabla 5.21 Rugosidades absolutas en algunos materiales (Sotelo, 2002) .....                                      | 146 |
| Tabla 5.22 Valores del coeficiente k por tipo de accesorio (Sotelo) .....                                        | 148 |
| Tabla 5.23 Coeficientes de pérdidas locales en Línea de Impulsión y de Gravedad .....                            | 149 |
| Tabla 5.24 Coeficientes de pérdidas locales en deflexiones Línea de Impulsión .....                              | 150 |
| Tabla 5.25 Coeficientes de pérdidas locales en deflexiones Línea de Gravedad .....                               | 151 |
| Tabla 5.26 Coordenadas del trazo de la línea de conducción Tramo Impulsión .....                                 | 153 |
| Tabla 5.27 Coordenadas del trazo de la línea de conducción Tramo Gravedad .....                                  | 154 |
| Tabla 5.28 Datos de Puntos de Operación con condición de Tubería Nueva .....                                     | 155 |
| Tabla 5.29 Datos de Puntos de Operación con condición de Tubería Usada .....                                     | 156 |
| Tabla 5.30 Valores Iniciales para Modelo Hidráulico .....                                                        | 158 |
| Tabla 5.31 Datos de entrada para el Análisis de Transitorio en Línea de Agua Potable (Hammer) .....              | 164 |
| Tabla 5.32 Resultados de la carga hidráulica de trabajo, corrida 1 según Hammer .....                            | 166 |
| Tabla 5.33 Datos de entrada para la cámara de aire en el software Hammer .....                                   | 167 |
| Tabla 5.34 Resultados de la carga hidráulica de trabajo, corrida dos según Hammer .....                          | 169 |
| Tabla 5.35 Resultados de la carga hidráulica de trabajo, corrida tres según Hammer .....                         | 172 |
| Tabla 5.36 Resultados de la carga hidráulica de trabajo, corrida cuatro según Hammer .....                       | 174 |
| Tabla 5.37 Resultados de la carga hidráulica de trabajo, corrida cinco según Hammer (Ejemplo) .....              | 177 |
| Tabla 5.38 Diámetros de las válvulas de admisión y expulsión de aire en función del diámetro de la tubería ..... | 179 |
| Tabla 5.39 Ubicación de las válvulas de admisión y expulsión de aire .....                                       | 180 |



## Índice de láminas

|                                                                                                                                |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Lámina 1.1 Ubicación del Acueducto Chapala Guadalajara .....                                                                   | 6   |
| Lámina 1.2 Componentes del Acueducto Sustituto Chapala Guadalajara.....                                                        | 9   |
| Lámina 2.1 Cobertura de Servicio de Agua Potable del AMG. Fuente: Elaboración propia a partir de Información de SIAPA ..       | 12  |
| Lámina 2.2 Fuentes de Abastecimiento Superficiales del AMG operadas por SIAPA.....                                             | 13  |
| Lámina 2.3 Cobertura de Servicio de Agua Potable operada por SIAPA por Fuentes de Abastecimiento .....                         | 15  |
| Lámina 2.4 Ubicación del AMG y Regiones del Estado de Jalisco.....                                                             | 17  |
| Lámina 2.5 Delimitación del AMG.....                                                                                           | 18  |
| Lámina 2.6 Unidades climatológicas de la zona de estudio.....                                                                  | 20  |
| Lámina 2.7 Clasificación del tipo de roca del AMG (Fuente: Elaboración propia con datos de INEGI) .....                        | 24  |
| Lámina 2.8 Uso de suelo del AMG (Fuente: Elaboración propia con datos de INEGI - Serie VII de Uso de Suelo y Vegetación) ..... | 26  |
| Lámina 2.9 Hidrografía del AMG.....                                                                                            | 28  |
| Lámina 2.10 Disponibilidad hídrica de aguas superficiales en el AMG.....                                                       | 33  |
| Lámina 2.11 Disponibilidad de aguas subterránea de los acuíferos localizados en el AMG .....                                   | 34  |
| Lámina 2.12 Relieve del AMG .....                                                                                              | 36  |
| Lámina 2.13 Análisis de Pendientes del AMG .....                                                                               | 37  |
| Lámina 2.14 Huella del Crecimiento de las Zonas Urbanizadas en el AMG.....                                                     | 38  |
| Lámina 2.15 Escenario tendencial 2045 .....                                                                                    | 40  |
| Lámina 2.16 Zonificación primaria del AMG .....                                                                                | 42  |
| Lámina 2.17 Macro perspectiva en el uso de suelo .....                                                                         | 44  |
| Lámina 2.18 Vialidades principales del AMG (fuente: POTMet, IMEPLAN) .....                                                     | 46  |
| Lámina 2.19 Grado de conectividad del AMG (fuente: POTMet, IMEPLAN) .....                                                      | 50  |
| Lámina 2.20 Vías férreas, aeropuertos y terminales (fuente: POTMet, IMEPLAN) .....                                             | 51  |
| Lámina 2.21 Cobertura de transporte público del AMG (fuente: POTMet, IMEPLAN).....                                             | 52  |
| Lámina 2.22 Grado de marginación del AMG (con datos de la plataforma SIGMetro, IMEPLAN) .....                                  | 57  |
| Lámina 2.23 Índice de servicios básicos (con datos de la plataforma SIGMetro, IMEPLAN) .....                                   | 58  |
| Lámina 3.1 Línea de Conducción Estación de Bombeo a Tanque de Cambio de Régimen.....                                           | 64  |
| Lámina 3.2 Tanque de Oscilación.....                                                                                           | 64  |
| Lámina 3.3 Tanque de Cambio de Régimen.....                                                                                    | 65  |
| Lámina 3.4 Línea de Conducción de Tanque de Cambio de Régimen a Tanque de Entrega .....                                        | 66  |
| Lámina 3.5 Tanque de Entrega.....                                                                                              | 66  |
| Lámina 4.1 Área de estudio Acueducto Sustituto Chapala Guadalajara.....                                                        | 72  |
| Lámina 4.2 Planimetría, Altimetría y Ortofoto .....                                                                            | 74  |
| Lámina 4.3 Ubicación y Datos de Puntos GPS.....                                                                                | 75  |
| Lámina 4.4 Planos Topográficos.....                                                                                            | 78  |
| Lámina 4.5 Ubicación de los muestreos de calidad del agua .....                                                                | 80  |
| Lámina 4.6 Ubicación de SPT a lo largo del eje de trazo del Acueducto.....                                                     | 89  |
| Lámina 4.7 Ubicación de PCA a lo largo del eje de trazo del Acueducto .....                                                    | 91  |
| Lámina 5.1 Perfil topográfico del trazo del acueducto .....                                                                    | 113 |
| Lámina 5.2 Perfil topográfico de la línea de impulsión.....                                                                    | 116 |
| Lámina 5.3 Perfil topográfico de la línea de gravedad .....                                                                    | 117 |
| Lámina 5.4 Diseño conceptual de la línea de impulsión .....                                                                    | 118 |

## 1. Resumen ejecutivo

La Secretaría de Gestión Integral del Agua y la Comisión Estatal del Agua requiere del reforzamiento del Sistema de Abastecimiento y Distribución del Agua Potable en el AMG principalmente en el Acueducto Chapala Guadalajara que abastece al 60% de la población.

La razón principal es contar con infraestructura para que se asegure el suministro de agua potable en cantidad, calidad y a la presión adecuada a toda la población en las próximas generaciones y optimizando el costo energético en la operación para el organismo operador.

El acueducto Chapala – Guadalajara se ha mantenido en operación continua desde que fue puesto en operación en 1992, con pocas acciones de mantenimiento. La condición anterior ha generado un deterioro notable en su capacidad de conducción por lo que presenta una alta probabilidad de falla y serias limitaciones en su operación.

La obra en comento pretende ser la infraestructura de respaldo del actual Acueducto Chapala con el objetivo de poder garantizar la redundancia del sistema actual para el abastecimiento del AMG y con ello poder realizar las acciones de prevención y mantenimiento con el fin de resguardar y garantizar el abastecimiento de la fuente principal del AMG. En la lámina 1.1 se muestra una la ubicación del Acueducto Chapala Guadalajara



Lámina 1.1 Ubicación del Acueducto Chapala Guadalajara

El sistema ha sido diseñado para una capacidad máxima de conducción de 10.0 m<sup>3</sup>/s, correspondiente al gasto pico de operación requerido para optimizar el régimen de bombeo.

No obstante, el volumen anual conducido se mantiene dentro del límite establecido en el título de concesión vigente (236 hm<sup>3</sup>/año, equivalente a 7.5 m<sup>3</sup>/s en promedio), mediante una estrategia de operación intermitente que reduce las horas efectivas de bombeo diario.

Este esquema permite desplazar la operación hacia horarios de menor costo energético, disminuyendo el consumo en horas punta y optimizando el costo global del sistema, sin comprometer la disponibilidad del recurso hídrico ni exceder los volúmenes concesionados.

El dimensionamiento hidráulico de la infraestructura se realizó con base en el gasto máximo instantáneo (10.0 m<sup>3</sup>/s), garantizando condiciones adecuadas de operación bajo escenarios de demanda pico y asegurando la flexibilidad operativa del sistema.

La disponibilidad de los volúmenes del Lago de Chapala se respalda en el Título de Concesión 08JAL125681/12HSDA18.

Debido a las condiciones topográficas que imperan en la zona, el diseño y construcción del acueducto se dividen en los siguientes frentes:

- Adecuación del cárcamo de Bombeo del Canal de Llamada Chapala.
- Estación de bombeo: Se equipará la estación con 4+R bombas y una de reserva tipo *booster*, que permitirán aprovechar la carga disponible en el Lago y reducir consumos de energía eléctrica. Los equipos tendrán una capacidad de bombeo de 2000 litros por segundo y con una carga dinámica total (CDT) de 120.80 metros columna de agua con una potencia de 3855 HP por equipo.
- Dispositivos para el Golpe de Ariete: Se construirán 5 + R cámaras de aire de 3.50 metros de diámetro y 18 metros de altura para un volumen de inicial de 182 m<sup>3</sup> por cámara. Además, un tanque de oscilación de 20 metros de diámetro y 35 metros de altura ubicado en el km 8+780 del Acueducto.
- Ampliación de la infraestructura para el abastecimiento eléctrico de la estación de bombeo: Se efectuará la construcción de subestación eléctrica para la nueva estación de bombeo.
- Línea de impulsión de la estación de bombeo al tanque de cambio de régimen: tendrá una capacidad de conducción de 10.00 m<sup>3</sup>/s con una longitud de 25.92 km para la carga dinámica total requerida y se utilizará tubería de acero ASTM A-53 de 106" de diámetro con espesores variables de 5/8" y 3/4" según la presión máxima alcanzada durante el fenómeno transitorio.
- Tanque de cambio de régimen: Tendrá forma rectangular, con un volumen efectivo de 6000 m<sup>3</sup>, una longitud de 105 metros y un ancho de 16 metros y altura efectiva de 8 metros. Será construido en concreto reforzado.
- Línea de conducción por gravedad al Tanque de Entrega Cerro del Cuatro: tendrá una capacidad de conducción de 10.00 m<sup>3</sup>/s con una longitud de 16.46 km y un desnivel topográfico de 25m, estará constituida por tubería de acero ASTM A-53 de 106" de diámetro con espesor de 5/8" para la presión máxima alcanzada durante el fenómeno transitorio.
- Caja de Operación de Válvulas: tendrá 3 válvulas de control para la operación del Tanque de Entrega.

- Tanque de Entrega: Actualmente esta estructura cuenta con 35,000 m<sup>3</sup> de capacidad y se pretende ampliar a 42,000 m<sup>3</sup>.

En la tabla 1.1. se muestran las coordenadas de los componentes principales del Acueducto así como las elevaciones del terreno referenciadas al nivel medio del mar.

*Tabla 1.1 Cuadro de coordenadas de los componentes principales del acueducto*

| No. | Componente                  | Coordenada E | Coordenada N  | Elevación (msnm) |
|-----|-----------------------------|--------------|---------------|------------------|
| 1   | Canal de Llamada            | 693,679.916  | 2'247,520.483 | 1526.30          |
| 2   | Estación de bombeo          | 693,581.762  | 2'247,585.593 | 1526.80          |
| 3   | Tanque de Oscilación        | 687,358.207  | 2'251,537.296 | 1609.50          |
| 4   | Tanque de cambio de régimen | 677,283.998  | 2'263,435.387 | 1614.00          |
| 5   | Caja de Control             | 673,646.955  | 2'266,500.377 | 1560.00          |
| 6   | Tanque de entrega           | 670,800.410  | 2'276,909.262 | 1586.00          |

El objetivo del presente documento es fungir como el informe general del proyecto, en el cual se incluirá una descripción detallada del diseño de los componentes principales del proyecto. Dejando como anexos, el diseño de las obras complementarias a la obra principal. En la lámina 1.2 se puede apreciar geográficamente los componentes principales del Acueducto Sustituto Chapala Guadalajara.





Lámina 1.2 Componentes del Acueducto Sustituto Chapala Guadalajara

## 2. Planeación

### 2.1. Antecedentes

#### 2.1.1. Esquema de abastecimiento actual del AMG

El Área Metropolitana de Guadalajara (AMG) es la segunda metrópoli más grande de México, con una población de poco más de 5.2 millones de habitantes, y una superficie de 3,265.46 km<sup>2</sup>, de los cuales 883 son clasificados como superficie urbana. Comprende nueve municipios: El Salto, Guadalajara, Ixtlahuacán de los Membrillos, Juanacatlán, San Pedro Tlaquepaque, Tlajomulco de Zúñiga, Tonalá, Zapopan y Zapotlanejo. (Agenda de Resiliencia Hídrica del Área Metropolitana de Guadalajara, IMEPLAN, 2023)

El AMG se localiza en la cuenca del Valle del Río Grande de Santiago, en los Valles de Atemajac y la Planicie de Tonalá, entre las provincias montañosas de la Sierra Madre Occidental y el Eje Neovolcánico, en la Región Centro del Estado de Jalisco.

Derivado del artículo 94 de la Ley de Gobierno y la Administración Pública Municipal del Estado, la infraestructura urbana es la que corresponde a los servicios públicos municipales tales como el agua potable, el alcantarillado, energía eléctrica y recolección de residuos sólidos. De manera introductoria a continuación se menciona la situación general de la infraestructura urbana y servicios públicos municipales antes mencionados.

Los servicios de agua potable y alcantarillado son proporcionados por organismos públicos descentralizados y comisiones edilicias, siendo esta heterogeneidad una de las grandes problemáticas en la prestación del servicio metropolitano. En Guadalajara, Tlaquepaque, Zapopan y Tonalá se abastece a la mayoría de la población a través del Sistema Intermunicipal de Agua Potable y Alcantarillado (SIAPA). A pesar de esto el municipio de Tonalá aún no tiene abastecimiento en la totalidad del territorio. En Tlajomulco, opera el Sistema de Agua Tlajomulco (SIAT); y el resto de los municipios son operados por las comisiones edilicias de agua potable y alcantarillado. La lámina 1.2 muestra la cobertura del Servicio de Agua Potable en la AMG.

Dicha cobertura se abastece tanto de fuentes de abastecimiento superficiales y subterráneas que cuentan con sus títulos de concesión para el uso público urbano. El total del volumen concesionado es de 19.89 metros cúbicos por segundo hoy en día.

*Tabla 2.1 Fuentes de abastecimiento actuales del AMG (Fuente: CEA Jalisco 2015-2018)*

| Fuente de abastecimiento               | Volumen concesionado |                 | Título de concesión  |
|----------------------------------------|----------------------|-----------------|----------------------|
|                                        | m <sup>3</sup> /s    | hm <sup>3</sup> |                      |
| Sistema acueducto Chapala-Guadalajara  | 7.500                | 236.00          | 08JAL125681/12HSDA18 |
| Sistema antiguo Chapala-Guadalajara    |                      |                 |                      |
| Sistema de presas La Red-Calderón      | 2.000                | 63.07           | 08JAL125681/12HSDA18 |
| Manantiales                            | 0.250                | 7.88            | 08JAL100308/12HMDA17 |
| Aguas subterráneas (pozos profundos)   | 3.040                | 95.87           | 08JAL100308/12HMDA18 |
| Presa Zapotillo                        | 5.600                | 176.60          | 08JAL155095/12HAOC15 |
| Otras fuentes no operadas por el SIAPA | 1.500                | 47.304          | Varios               |
| <b>Total</b>                           | <b>19.890</b>        | <b>626.734</b>  |                      |



La lámina 2.1 muestra en color azul la cobertura por parte del SIAPA, que abarca una superficie de 506 km<sup>2</sup> de un total de 883 km<sup>2</sup> de área urbanizada, lo que representa el 57% de la cobertura y donde se puede observar que las zonas fuera de esta cobertura son dispersas y donde la zona al sur resalta por ser la de mayor dimensión sin este tipo de servicio intermunicipal.

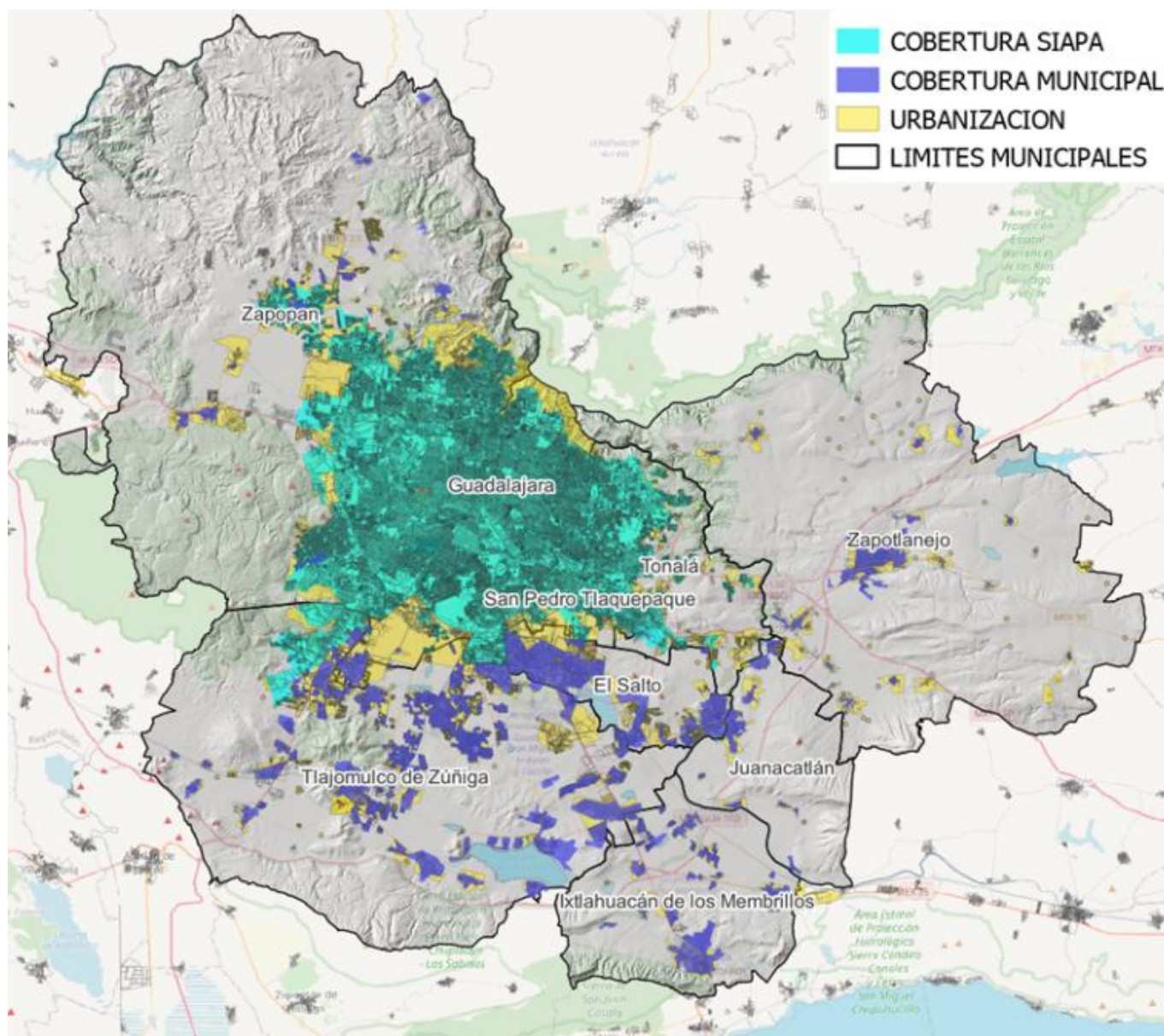


Lámina 2.1 Cobertura de Servicio de Agua Potable del AMG. (Fuente: Elaboración propia a partir de Información de SIAPA, 2024)

Las fuentes de abastecimiento superficiales operadas por el Organismo Operador SIAPA se pueden englobar en el Sistema Chapala cuya infraestructura para el aprovechamiento del mismo consta del Sistema Antiguo (Conducción en Canal, 1956) y el

Acueducto Chapala Guadalajara (Conducción Cerrada, 1992) y 2 plantas potabilizadoras (Miravalle 1956-1975) y (Las Huertas 2000) y por otro lado el Sistema Calderón (1975) al que se le agregó el Sistema de Presas Zapotillo-La Red- Calderón (2024) el cual recibe el caudal en la Planta Potabilizadora No. 3 San Gaspar (1976). Lo anterior se muestra en la lámina 2.2.

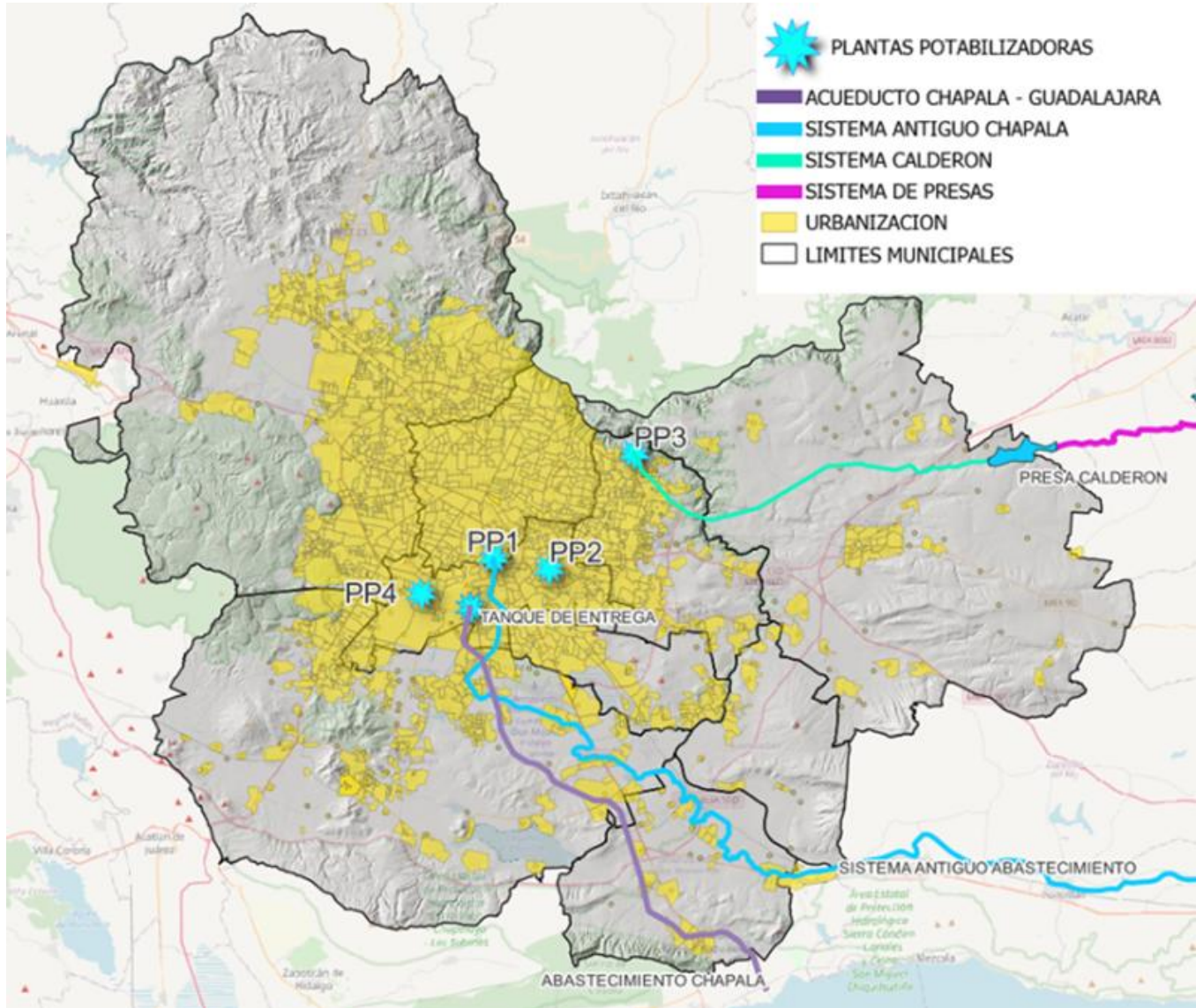


Lámina 2.2 Fuentes de Abastecimiento Superficiales del AMG operadas por SIAPA.  
(Fuente: Elaboración propia a partir de Información de SIAPA, 2024)



A continuación, se presenta una breve descripción de los Sistemas que conforman la infraestructura actual de las fuentes de abastecimiento superficial que opera el SIAPA.

## **SISTEMA CHAPALA**

El Lago de Chapala es la principal fuente de abastecimiento a la ciudad y su aprovechamiento se realiza desde 1956 a través del cauce del Río Santiago por aproximadamente 18 kms hasta la Presa Poncitlán. Posteriormente se continúan 20 kms más por el mismo Río Santiago hasta la Presa Corona para continuar por el Canal Atequiza en una longitud de 28 kms hasta la planta de bombeo No. 1 La Calera. En este tramo, la ciudad comparte los caudales con las Zonas de Riego aledañas al Sistema y a partir de este punto se bombean hasta 10 m<sup>3</sup>/seg con una carga de 22 mts hacia el Canal de las Pintas en una longitud de 24.5 kms hasta llegar a la Presa Las Pintas para su almacenamiento y presedimentación. La Planta de Bombeo No. 2 recibe el caudal a través del canal de 450 mts de longitud y se eleva este caudal hasta el Canal del Cerro del Cuatro por una altura de aproximada de 70 mts. Este conducto es cerrado teniendo secciones variables (rectangular, trapezoidal y tipo herradura) en una longitud de 3 kms hasta llegar a la Planta Potabilizadora No.1 Miravalle. Este sistema se le conoce como Sistema Antiguo.

En 1992 se inició la operación del Acueducto Chapala-Guadalajara que consiste en una tubería de 2.10mts de diámetro en concreto reforzado y una longitud de 42.6 kms para una capacidad de conducción de 7.5 m<sup>3</sup>/seg el cual inicia la estación de bombeo ubicada entre las localidades de Santa Cruz de la Soledad y San Nicolás de Ibarra, en el municipio de Chapala, donde se construyó un canal de llamada de 1300 mts de longitud. Se requieren vencer 138 mts de altura hasta el Tanque de Cambio de Régimen cuya capacidad es de 35,000 m<sup>3</sup> ubicado en el km 27 en el Municipio de Tlajomulco, el acueducto continúa por la Prolongación de la Av. Adolf Horn hasta la Presa de las Pintas SIAPA en la colonia Toluquilla del municipio de San Pedro Tlaquepaque en donde se localiza la Planta de Bombeo del mismo nombre, venciendo una carga de 80 mts aproximadamente así se bombea a caja de enlace y posteriormente a través de canal de concreto en conducto cerrado llega finalmente a la Planta Potabilizadora Miravalle.

## **SISTEMA DE PRESAS ZAPOTILLO-EL SALTO-LA RED-CALDERON**

Por otro lado, el sistema que compone el abastecimiento de la presa Zapotillo tiene su origen en el municipio de Cañadas de Obregón al noreste del Área Metropolitana de Guadalajara, su cauce tiene un recorrido total aproximado de 120 kilómetros a partir de esta fuente, se conduce hacia la presa El Salto en una longitud aproximada a los 27 kilómetros en el municipio de Valle de Guadalupe, sigue hacia la presa la Red por 47 kilómetros hasta el municipio de Tepatlán de Morelos y continua a la presa Calderón por 15 kilómetros hasta el municipio de Zapotlanejo donde a través del Acueducto Calderón finalmente se destina a la planta potabilizadora No. 3 San Gaspar en la colonia La Noria en los últimos 31 kilómetros en el municipio de Tonalá. Este último sistema mencionado inició parte de su funcionamiento este 2025 quedando pendiente la sustitución del Acueducto Calderón para la capacidad total del sistema a la fecha.

Adicionalmente a las fuentes de abastecimiento superficial, el AMG depende de Pozos Profundos y Manantiales sobre en la zona Norponiente y periferia del AMG. En la lámina 2.3 se puede observar la distribución por las diferentes Fuentes de Abastecimiento.

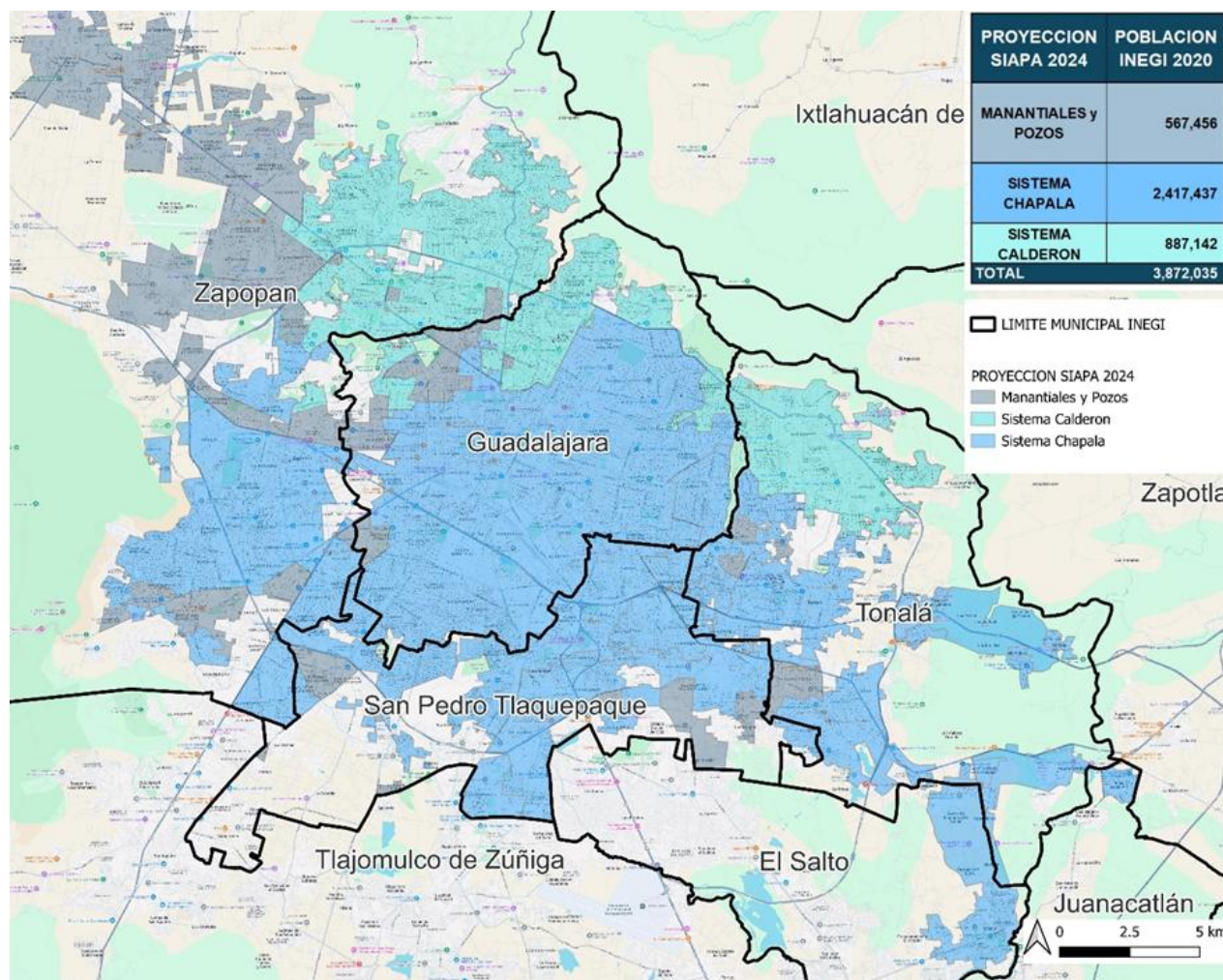


Lámina 2.3 Cobertura de Servicio de Agua Potable operada por SIAPA por Fuentes de Abastecimiento  
(Fuente: Elaboración propia con datos de SIAPA, 2024)

En la Tabla 2.2 se muestran las poblaciones atendidas por tipo de fuente y el porcentaje resultante. Como puede observarse si se logra que las fuentes superficiales cuenten con una infraestructura eficiente podemos reducir el uso de las fuentes subterráneas.

Tabla 2.2 Población servida por Fuentes de Abastecimiento (Fuente: Elaboración propia con datos de INEGI 2020)

| FUENTE DE ABASTECIMIENTO | POBLACION<br>CENSO INEGI<br>2020 | DEMANDA<br>m3/seg | % |
|--------------------------|----------------------------------|-------------------|---|
|--------------------------|----------------------------------|-------------------|---|



|                     |           |      |         |
|---------------------|-----------|------|---------|
| SISTEMA CHAPALA     | 2417437   | 5.88 | 62.43%  |
| SISTEMA CALDERON    | 887,142   | 2.16 | 22.91%  |
| POZOS Y MANANTIALES | 567,456   | 1.38 | 14.66%  |
| SUMAS               | 3'872,035 | 9.42 | 100.00% |

## 2.2. Marco físico del AMG

### 2.2.1. Ubicación geográfica

El Área Metropolitana de Guadalajara está compuesta por nueve municipios: Guadalajara, Zapopan, San Pedro Tlaquepaque, Tonalá, Tlajomulco de Zúñiga, Ixtlahuacán de los Membrillos, Juanacatlán, El Salto y Zapotlanejo<sup>1</sup> y se localiza dentro de la Región Centro del Estado de Jalisco. En la lámina 2.4 se puede observar en color rojo el perímetro y su relación geográfica dentro del Estado de Jalisco. Las coordenadas geográficas del Municipio de Guadalajara son Latitud: Entre 20° 36' N y 20° 45' N y Longitud: Entre 103° 15' W y 103° 24' W que en términos tradicionales es el núcleo administrativo de la metrópoli.

<sup>1</sup> Instituto Metropolitano de Planeación (IMEPLAN). Área Metropolitana de Guadalajara. Recuperado en agosto 2023, de [<https://www.imeplan.mx/>].

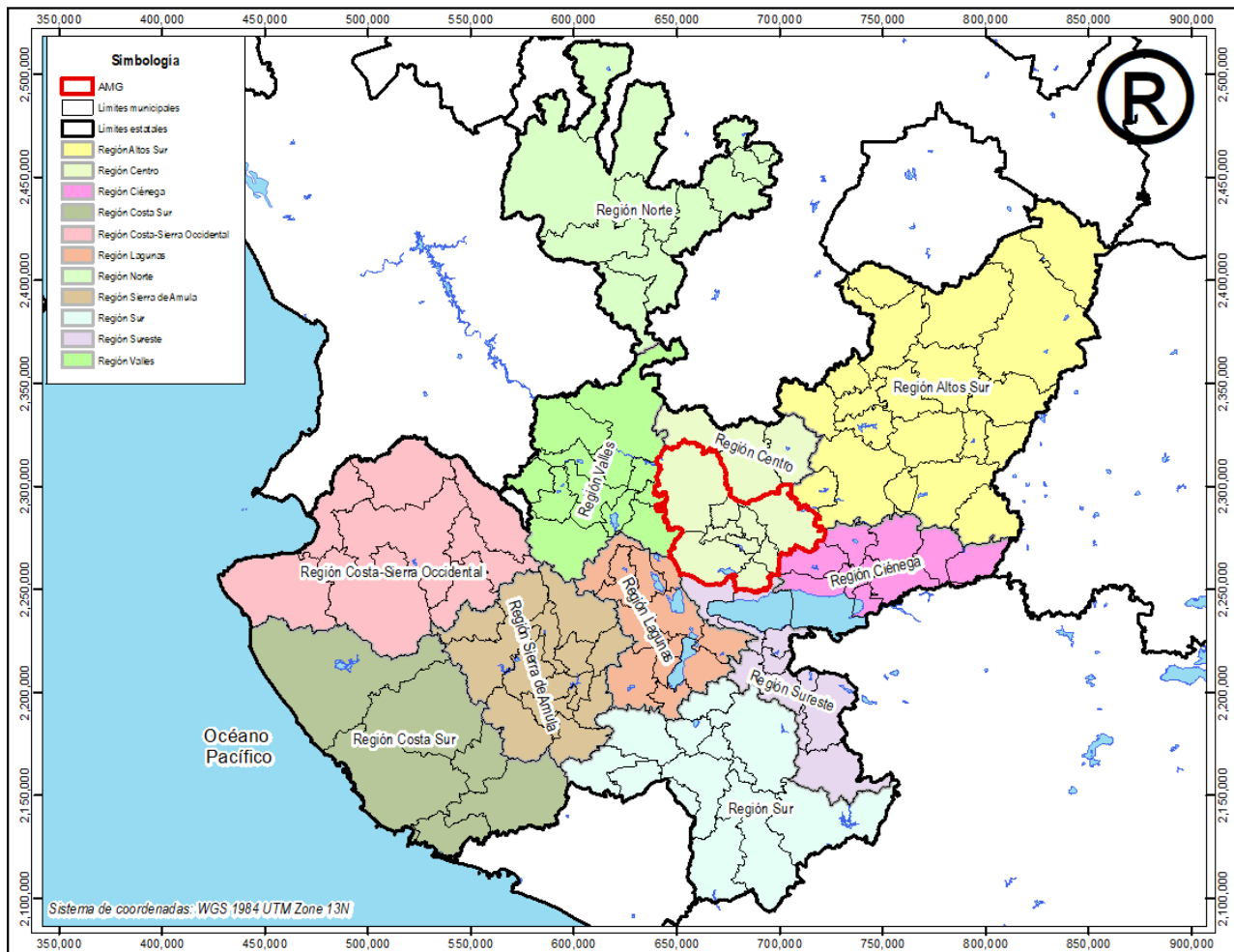


Lámina 2.4 Ubicación del AMG y Regiones del Estado de Jalisco. (Fuente: Elaboración Propia a partir de datos de INEGI)

El Área Metropolitana de Guadalajara (AMG) se divide en dos partes principales en términos de su extensión territorial. Primero, el área urbanizada cubre 883 km<sup>2</sup>, lo que corresponde aproximadamente al 27% de la totalidad del AMG. En segundo lugar, el área no urbanizada abarca 2,382 km<sup>2</sup>, representando así el 73% del área total. Finalmente, la superficie total del AMG es de 3,265 km<sup>2</sup>, abarcando la totalidad del área metropolitana<sup>2</sup>. Ver Lámina 2.5 y Tabla 2.3

<sup>2</sup> Elaboración propia con datos del sistema Intermunicipal de los Servicios de Agua Potable y Alcantarillado (2022). Plan Institucional del Sistema Intermunicipal de los Servicios de Agua Potable y Alcantarillado. Septiembre 2023, de [plan.jalisco.gob.mx/wp-content/uploads/2022/12/PI-SIAPA-2022-Paginado.pdf](http://plan.jalisco.gob.mx/wp-content/uploads/2022/12/PI-SIAPA-2022-Paginado.pdf).

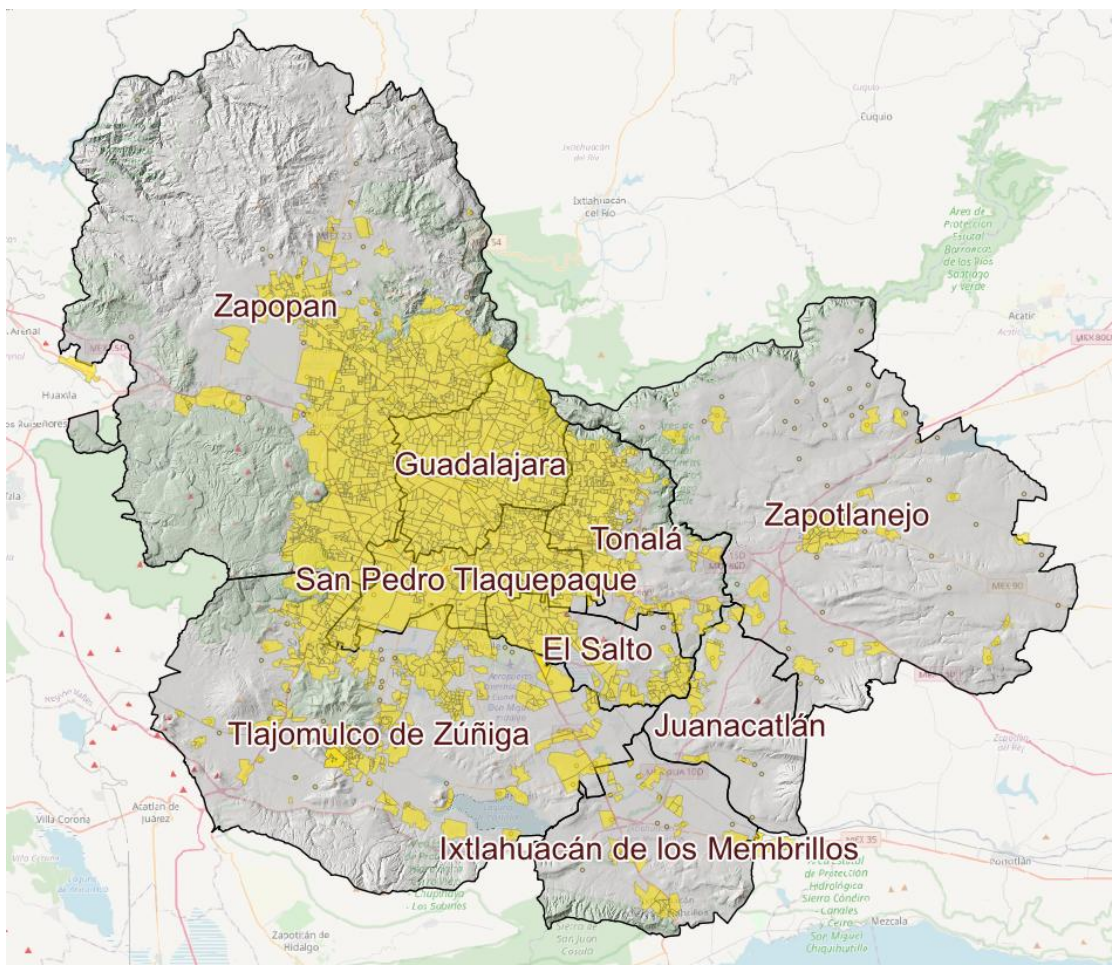


Lámina 2.5 Delimitación del AMG (Fuente: Elaboración Propia a partir de datos de INEGI)

Tabla 2.3 Superficie total por áreas del AMG

| Área Metropolitana de Guadalajara (km <sup>2</sup> ) |       |      |
|------------------------------------------------------|-------|------|
| Área Urbanizada                                      | 883   | 27%  |
| Área no urbanizada                                   | 2,382 | 73%  |
| Superficie total                                     | 3,265 | 100% |

## 2.2.2. Población

La distribución de la población del AMG se concentra en los territorios urbanizados de cada municipio y no es proporcional a la extensión del área urbana. Cabe mencionar que Zapopan es el municipio con mayor superficie urbanizada y el que concentra mayor población. Por otro lado, la población asentada en el AMG y clasificada por los Municipios que la conforman se pueden visualizar en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, siendo los Municipios de Guadalajara y San Pedro Tlaquepaque los de mayor densidad de habitantes por km<sup>2</sup>.



*Tabla 2.4 Población, Superficies y Densidades del AMG*

| <b>Área Metropolitana de Guadalajara</b> |                               | <b>Censo 2020</b> | <b>Superficie (km<sup>2</sup>)</b> | <b>Densidad (Hab/Km<sup>2</sup>)</b> |
|------------------------------------------|-------------------------------|-------------------|------------------------------------|--------------------------------------|
| 1                                        | El Salto                      | 232,852           | 92.39                              | 2520.32                              |
| 2                                        | Guadalajara                   | 1,385,629         | 150.36                             | 9215.41                              |
| 3                                        | Ixtlahuacán de los Membrillos | 67,969            | 184.32                             | 368.76                               |
| 4                                        | Juanacatlán                   | 30,855            | 141.22                             | 218.49                               |
| 5                                        | San Pedro Tlaquepaque         | 687,127           | 118.60                             | 5793.65                              |
| 6                                        | Tlajomulco de Zúñiga          | 727,750           | 682.50                             | 1066.30                              |
| 7                                        | Tonalá                        | 569,913           | 156.50                             | 3641.62                              |
| 8                                        | Zapopan                       | 1,476,491         | 1017.24                            | 1451.47                              |
| 9                                        | Zapotlanejo                   | 64,806            | 722.33                             | 89.72                                |
| <b>Total</b>                             |                               | <b>5,243,392</b>  | <b>3265.00</b>                     | <b>1605.71</b>                       |

En tanto a las proyecciones poblacionales, éstas son referencia para las acciones de previsión en materia de necesidad de servicios e infraestructura para el abasto de agua potable. Dentro del Plan de ordenamiento Territorial del AMG, se presentan las cifras de 2025, 2030, 2035 y 2040 las cuales forman parte de la Proyección de Población de CONAPO 2024.

*Tabla 2.5 Proyecciones de Población del AMG Fuente; CONAPO 2024*

| <b>Área Metropolitana de Guadalajara</b> | <b>2025</b>      | <b>2030</b>      | <b>2035</b>      | <b>2040</b>      |
|------------------------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| El Salto                                 | 294,703          | 354,920          | 416,805          | 475,964          |
| Guadalajara                              | 1,383,955        | 1,362,948        | 1,336,778        | 1,316,107        |
| Ixtlahuacán de los Membrillos            | 82,631           | 95,742           | 108,554          | 120,263          |
| Juanacatlán                              | 36,869           | 41,162           | 44,820           | 47,224           |
| San Pedro Tlaquepaque                    | 732,507          | 759,272          | 776,262          | 783,276          |
| Tlajomulco de Zúñiga                     | 829,928          | 914,861          | 1,004,364        | 1,105,538        |
| Tonalá                                   | 609,974          | 632,978          | 646,966          | 650,859          |
| Zapopan                                  | 1,597,906        | 1,689,444        | 1,778,917        | 1,876,674        |
| Zapotlanejo                              | 65,286           | 64,287           | 62,439           | 59,972           |
| <b>Total</b>                             | <b>5,633,759</b> | <b>5,915,614</b> | <b>6,175,905</b> | <b>6,435,877</b> |



### 2.2.3. Clima

El Área Metropolitana de Guadalajara (AMG) presenta una diversidad de climas que reflejan la interacción entre su relieve, latitud y patrones de precipitación. La clasificación climática permite identificar las condiciones predominantes y orientar políticas de planeación territorial y desarrollo de infraestructura. En la lámina 2.6 podemos observar las condiciones climáticas predominantes por zona de la AMG.

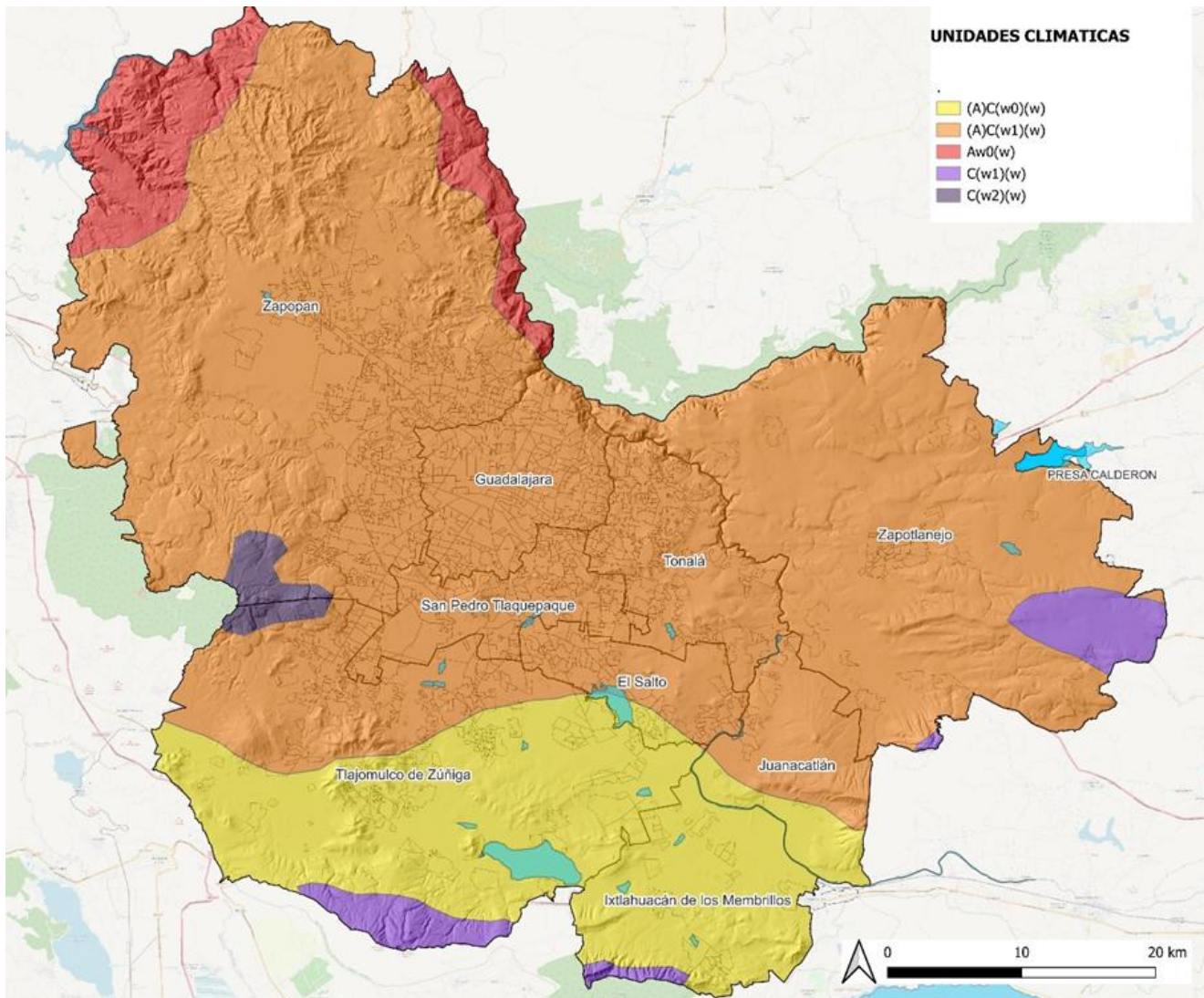


Lámina 2.6 Unidades climatológicas de la zona de estudio. (Fuente: Elaboración Propia a partir de datos de INEGI)

La tabla de unidades climáticas del AMG muestra cinco variantes principales. El clima (A)C(w1)(w), cálido subhúmedo de transición con lluvias en verano y precipitación invernal menor al 5%, ocupa la mayor extensión con 2,425 km<sup>2</sup>, lo que evidencia su predominio en la región. Le sigue el (A)C(w0)(w), también cálido subhúmedo con lluvias en verano pero con precipitación invernal entre 5 y 10%, que abarca 658 km<sup>2</sup>. En menor proporción aparece el clima Aw0(w), tropical con lluvias en verano y precipitación invernal de 5 a 10%, presente en 189 km<sup>2</sup>.

Dentro de los climas templados, el C(w1)(w), subhúmedo con lluvias en verano y menos del 5% de precipitación invernal, se distribuye en 98 km<sup>2</sup>, mientras que el C(w2)(w), con lluvias en verano y menos del 4% de precipitación invernal, ocupa apenas 35 km<sup>2</sup>. Estos últimos reflejan áreas más reducidas, generalmente asociadas a zonas de altitud mayor. El Área tiene una precipitación media anual de 888.59 mm, con un rango de variación de 774 mm a 987 mm. Se puede observar en la tabla 2.6 las unidades climáticas en kilómetros cuadrados dentro de la AMG.

*Tabla 2.6 Unidades Climáticas en el AMG*

| <b>Unidades Climáticas en el AMG</b> |                                                |                                 |            |          |
|--------------------------------------|------------------------------------------------|---------------------------------|------------|----------|
| <b>Clave</b>                         | <b>Descripción</b>                             | <b>% Precipitación Invernal</b> | <b>Km2</b> | <b>%</b> |
| (A)C(w1)(w)                          | Cálido subhúmedo transición, lluvias en verano | < 5%                            | 2425       | 71%      |
| (A)C(w0)(w)                          | Cálido subhúmedo, lluvias en verano            | 5–10%                           | 658        | 19%      |
| Aw0(w)                               | Tropical lluvias en verano                     | 5–10%                           | 189        | 6%       |
| C(w1)(w)                             | Templado subhúmedo, lluvias en verano          | < 5%                            | 98         | 3%       |
| C(w2)(w)                             | Templado subhúmedo, lluvias en verano          | < 4%                            | 35         | 1%       |

En conjunto, la información evidencia que el AMG se caracteriza principalmente por climas cálidos subhúmedos, con lluvias concentradas en verano y baja proporción de precipitación invernal. Los climas templados ocupan superficies menores, pero resultan relevantes para comprender la variabilidad ambiental en zonas específicas. Esta distribución climática es fundamental para la gestión urbana y ambiental, pues condiciona la disponibilidad de agua, la vegetación y la habitabilidad del territorio metropolitano.

## 2.2.4. Litología

El subsuelo pertenece al período Terciario, y se compone de rocas sedimentarias, rocas ígneas, extrusivas, riolita, andesita, basalto, toba y brecha volcánica.

La litología del Área Metropolitana de Guadalajara (AMG) se caracteriza por un claro predominio de rocas ígneas de origen volcánico, reflejo de la dinámica geológica regional. La toba ocupa la mayor extensión con más de 1,200 km<sup>2</sup>, seguida por el basalto, que cubre cerca de 990 km<sup>2</sup>, ambos derivados de procesos eruptivos que han modelado el relieve. También destacan las rocas extrusivas ácidas y extrusivas básicas, junto con la riolita y la andesita, que en conjunto consolidan la diversidad ígnea del territorio.

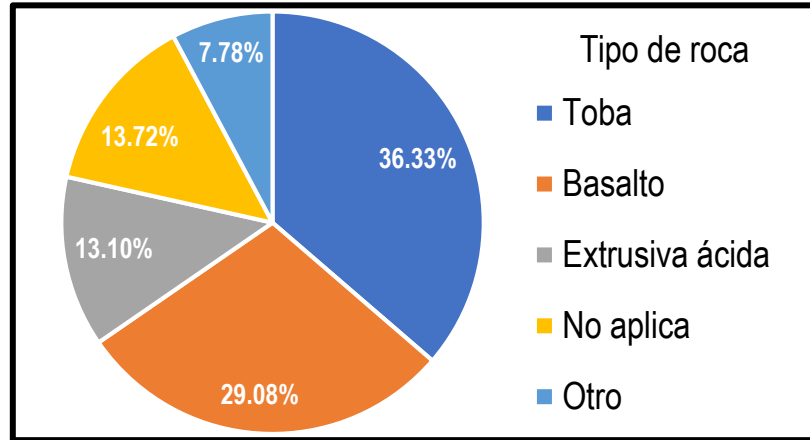
En menor proporción aparecen formaciones como la brecha volcánica y materiales de carácter vítreo, que evidencian episodios eruptivos específicos. Aunque la litología ígnea domina ampliamente, se registran áreas con materiales sedimentarios y zonas clasificadas como “no aplica”, que corresponden a espacios sin una roca predominante definida o con coberturas superficiales distintas.

Este mosaico litológico explica tanto la configuración del paisaje como la disponibilidad de recursos naturales y condiciona procesos de urbanización, uso de suelo y riesgos geológicos. La fuerte presencia de rocas volcánicas subraya la importancia de considerar la geodinámica regional en la planificación territorial y ambiental del AMG. En la tabla 2.7 se observa la clasificación de roca en la AMG, en donde se observa que la “toba” es la roca predominante con un 36.3% de predominancia en la región.

*Tabla 2.7 Clasificación del tipo de roca del AMG*

| Tipo de Roca (Litología) |                   |              |                        |      |
|--------------------------|-------------------|--------------|------------------------|------|
| Clave                    | Roca Predominante | Génesis      | km <sup>2</sup> en AMG | %    |
| T                        | Toba              | Ígnea        | 1238                   | 36.3 |
| B                        | Basalto           | Ígnea        | 990                    | 29.1 |
| Igea                     | Extrusiva ácida   | Ígnea        | 446                    | 13.1 |
| al                       | No aplica         | No aplica    | 335                    | 9.8  |
| re                       | No aplica         | No aplica    | 116                    | 3.4  |
| V                        | Vítrea            | Ígnea        | 82                     | 2.4  |
| R                        | Riolita           | Ígnea        | 69                     | 2.0  |
| A                        | Andesita          | Ígnea        | 65                     | 1.9  |
| Bv                       | Brecha volcánica  | Ígnea        | 28                     | 0.8  |
| Igeb                     | Extrusiva básica  | Ígnea        | 20                     | 0.6  |
| ar-cg                    | No aplica         | Sedimentaria | 17                     | 0.5  |

En la figura 2.1 se observa una gráfica de pie la cual demuestra los porcentajes por tipo de roca que se observan en la tabla 2.7.



*Figura 2.1 Gráfico de clasificación del tipo de roca del AMG*

En la lámina 2.7 se muestra la clasificación del tipo de roca en la AMG por colores, estos definen qué roca hay en cada región.



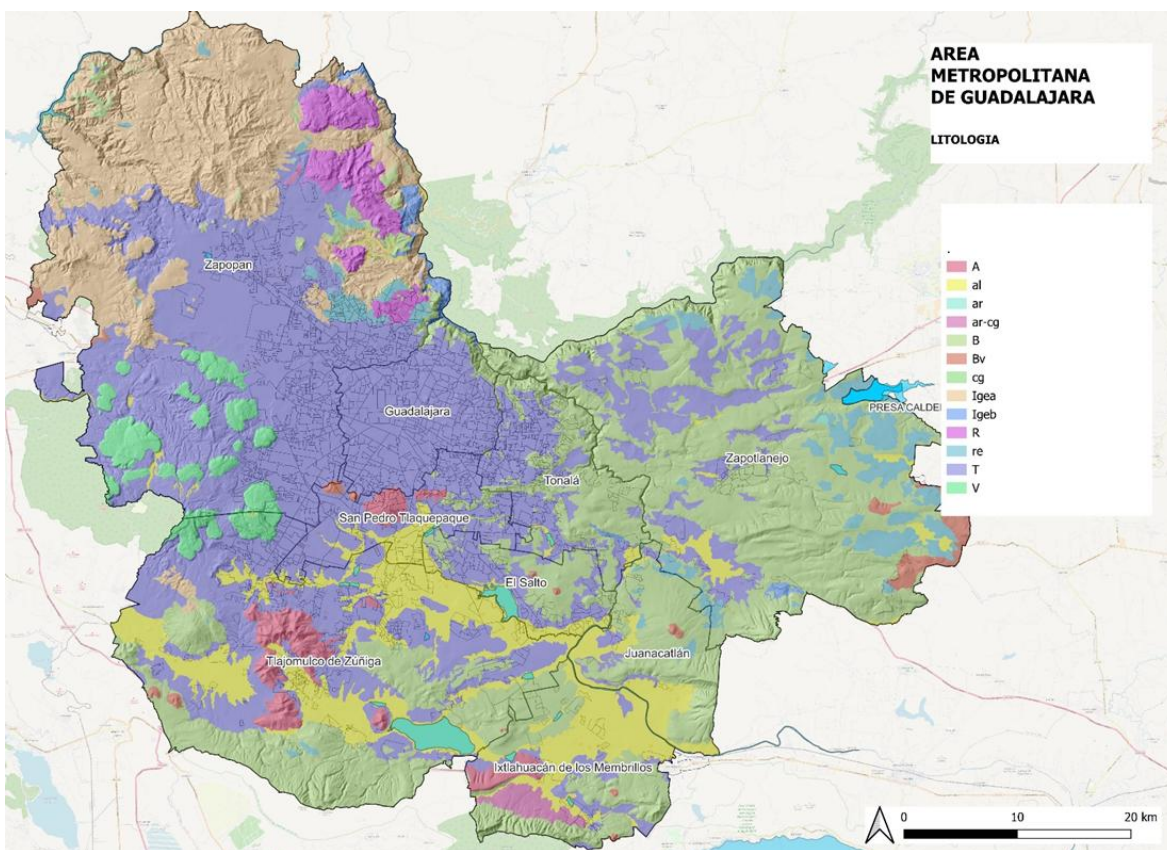


Lámina 2.7 Clasificación del tipo de roca del AMG (Fuente: Elaboración propia con datos de INEGI)

### 2.2.5. Uso de suelo y vegetación

El uso de suelo y la vegetación en el Área Metropolitana de Guadalajara (AMG) reflejan una marcada transformación territorial, con predominio de actividades agrícolas y urbanas. La agricultura de temporal anual ocupa la mayor extensión, con más de 1,100 km<sup>2</sup>, seguida por los asentamientos humanos, que abarcan alrededor de 693 km<sup>2</sup>, evidenciando la presión urbana sobre el entorno.

En segundo plano destacan los pastizales inducidos y la vegetación secundaria arbustiva de selva baja caducifolia, que juntos suman más de 550 km<sup>2</sup>, mostrando procesos de sustitución y degradación de ecosistemas originales. La agricultura de riego anual y los bosques de encino-pino y encino también tienen presencia significativa, aportando diversidad productiva y ambiental.

Los remanentes de selva baja caducifolia y los distintos tipos de vegetación secundaria vinculada a bosques de encino y pino-encino reflejan la fragmentación de la cobertura natural. Asimismo, los cuerpos de agua y áreas agrícolas de humedad, aunque menores en extensión, cumplen funciones estratégicas en la regulación hídrica.

En conjunto, el AMG presenta un mosaico territorial donde la expansión agrícola y urbana domina, mientras los ecosistemas forestales y selváticos persisten en áreas reducidas, subrayando la necesidad de gestión sostenible. En la figura 2.2 se puede observar una gráfica de pie en la que se muestra el uso de suelo en la AMG.

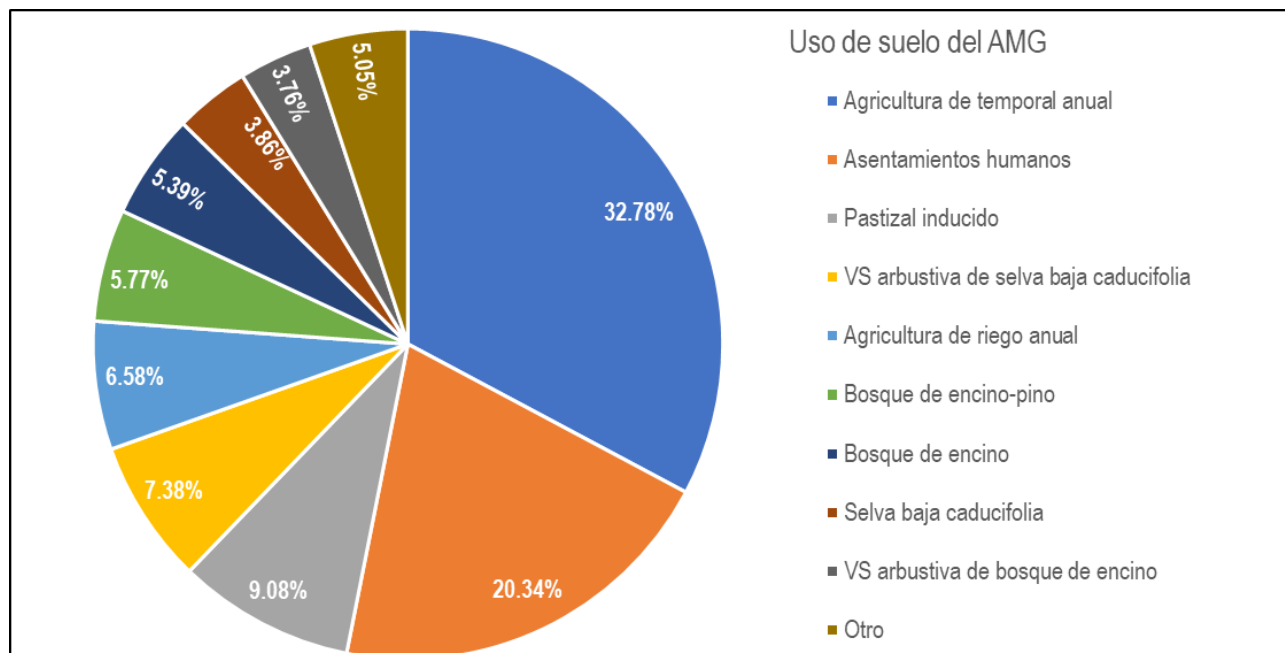


Figura 2.2 Uso del Suelo en el AMG

En la lámina 2.8 se muestra la clasificación del uso de suelo en la AMG por colores, estos definen qué uso de suelo y vegetación hay en cada región. Se puede observar el crecimiento de la mancha urbana hasta límites de bosques de encinos y pinos. Además en la periferia todavía existen zonas agrícolas sobre todo en la parte sur.



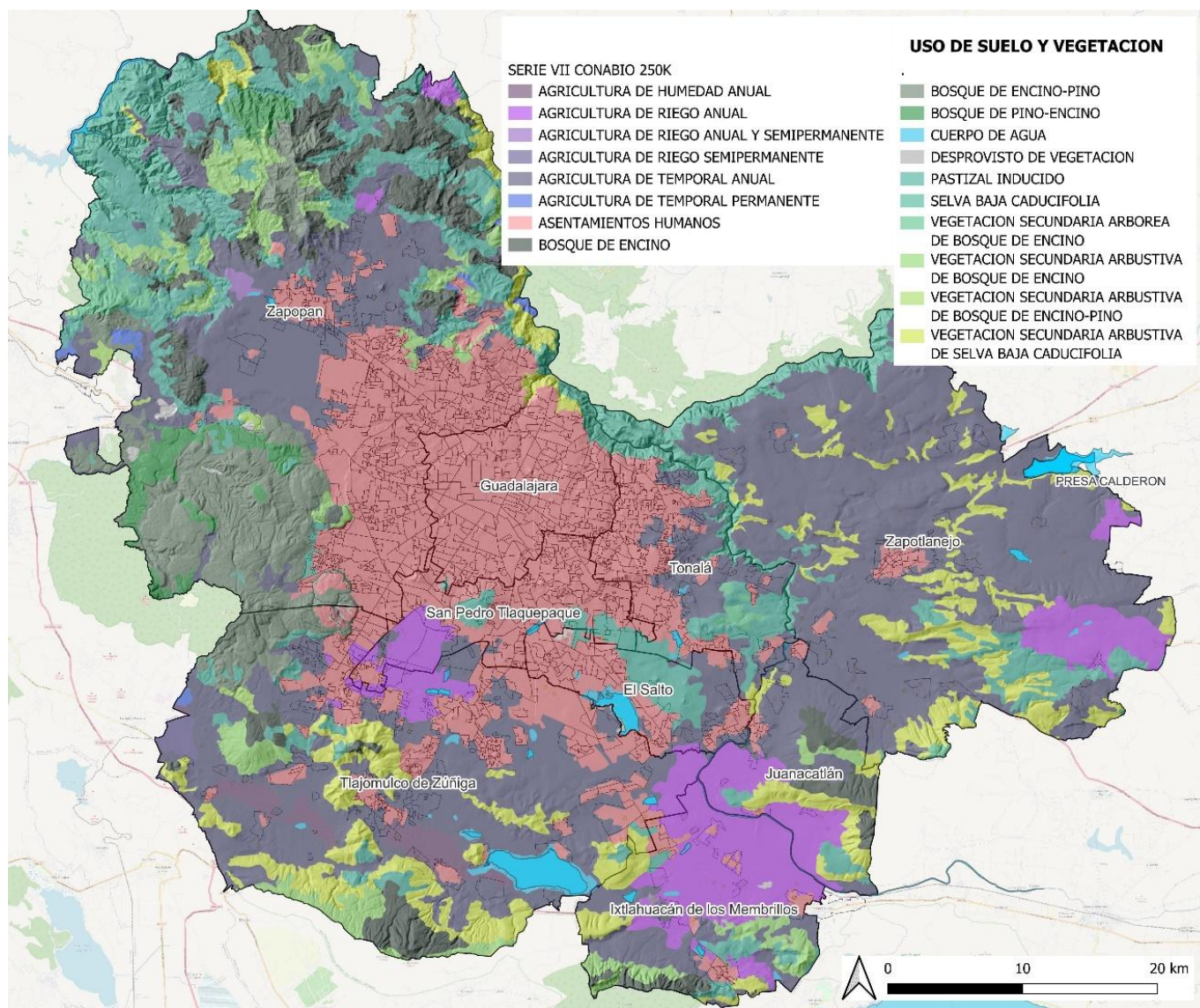


Lámina 2.8 Uso de suelo del AMG (Fuente: Elaboración propia con datos de INEGI - Serie VII de Uso de Suelo y Vegetación)

En la tabla 2.8 se muestra la clasificación del uso de suelo en la AMG por colores, se puede observar que la agricultura

de temporal anual tiene el mayor porcentaje, con 32.78% de la superficie total. Por otro lado los asentamientos humanos cubren el 20.34% y los bosques suman el 12.52%.

*Tabla 2.8 Uso de suelo del AMG*

| Uso                                         | Área (km <sup>2</sup> ) | Porcentaje |
|---------------------------------------------|-------------------------|------------|
| Agricultura de humedad anual                | 30.63                   | 0.90%      |
| Agricultura de riego anual                  | 224.22                  | 6.58%      |
| Agricultura de riego anual y semipermanente | 3.24                    | 0.10%      |
| Agricultura de riego permanente             | 0.37                    | 0.01%      |
| Agricultura de riego semipermanente         | 7.02                    | 0.21%      |
| Agricultura de temporal anual               | 1116.77                 | 32.78%     |
| Agricultura de temporal permanente          | 8.74                    | 0.26%      |
| Asentamientos humanos                       | 692.92                  | 20.34%     |
| Bosque de encino                            | 183.66                  | 5.39%      |
| Bosque de encino-pino                       | 196.47                  | 5.77%      |
| Bosque de pino-encino                       | 46.40                   | 1.36%      |
| Cuerpo de agua                              | 40.88                   | 1.20%      |
| Desprovisto de vegetación                   | 1.69                    | 0.05%      |
| Pastizal cultivado                          | 0.67                    | 0.02%      |
| Pastizal inducido                           | 309.34                  | 9.08%      |
| Selva baja caducifolia                      | 131.45                  | 3.86%      |
| Vegetación halófila hidrófila               | 1.10                    | 0.03%      |
| VS arbórea de bosque de encino              | 21.07                   | 0.62%      |
| VS arbórea de bosque de encino-pino         | 1.24                    | 0.04%      |
| VS arbórea de bosque de pino-encino         | 1.51                    | 0.04%      |
| VS arbustiva de bosque de encino            | 128.00                  | 3.76%      |
| VS arbustiva de bosque de encino-pino       | 5.94                    | 0.17%      |
| VS arbustiva de bosque de pino-encino       | 1.31                    | 0.04%      |
| VS arbustiva de selva baja caducifolia      | 251.53                  | 7.38%      |
| VS herbácea de bosque de encino-pino        | 0.32                    | 0.01%      |
| Suma                                        | 3406.49                 | 100.00%    |

## 2.2.6. Hidrografía

La hidrografía del Área Metropolitana de Guadalajara (AMG) se organiza en torno a diversas cuencas que forman parte de la región hidrológica Lerma-Santiago y, en menor medida, del río Ameca. El sistema principal es el río Santiago, cuyo recorrido se divide en tramos desde la salida del lago de Chapala hasta la estación hidrométrica Las Juntas y posteriormente hasta San Cristóbal II, con extensiones que superan los 2,500 km<sup>2</sup> dentro del AMG. A este sistema se suman cuerpos de agua relevantes como la presa Santa Rosa y las lagunas de Villa Corona, que se subdividen en dos segmentos vinculados al río San Antonio y la presa Hurtado.

El río Verde, con un tramo específico desde la estación hidrométrica La Cuña hasta su confluencia con el río Santiago, constituye un aporte estratégico en la dinámica hídrica regional. Otros afluentes menores, como el río Lerma en su séptimo tramo y el río Zula, complementan la red. Finalmente, el río Salado, con origen en varios afluentes y controlado en la estación La Vega, representa la conexión con la región del Ameca.



En conjunto, esta red hidrográfica refleja la complejidad territorial del AMG, articulando recursos hídricos que sostienen actividades urbanas, agrícolas y ambientales.

Por otro lado, en la Lámina 2.9 se puede observar la jerarquía de los cauces obtenido de datos de INEGI mediante el método Strahler, el cual clasifica a los mismos en base a sus afluentes, siendo los ríos principales los de mayor orden dentro de la cuenca. Esta clasificación es fundamental en hidrología para entender la estructura de las redes de drenaje, diferenciar las funciones de los cauces (erosión en los pequeños vs. transporte en los grandes) y caracterizar el comportamiento de una cuenca.

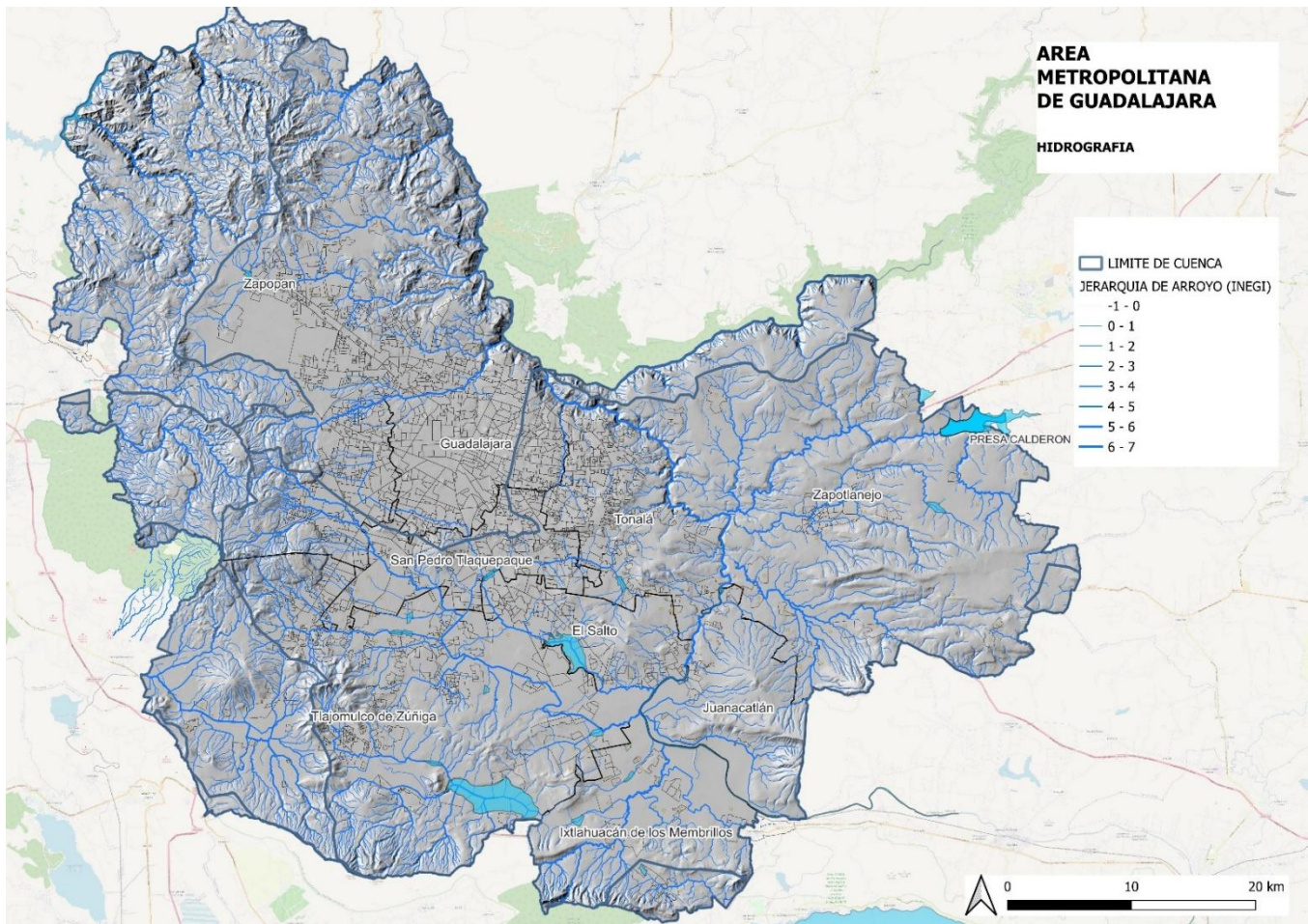


Lámina 2.9 Hidrografía del AMG (Fuente: Elaboración propia con datos de INEGI)

El AMG, se encuentra dentro de las regiones hidrológicas No. 12 Lerma Santiago (96.9%) y No. 14. Río Ameca (3.1%), pertenecientes al Región Hidrológica Administrativa No. 8 Lerma-Santiago-Pacífico.

A continuación, se presenta

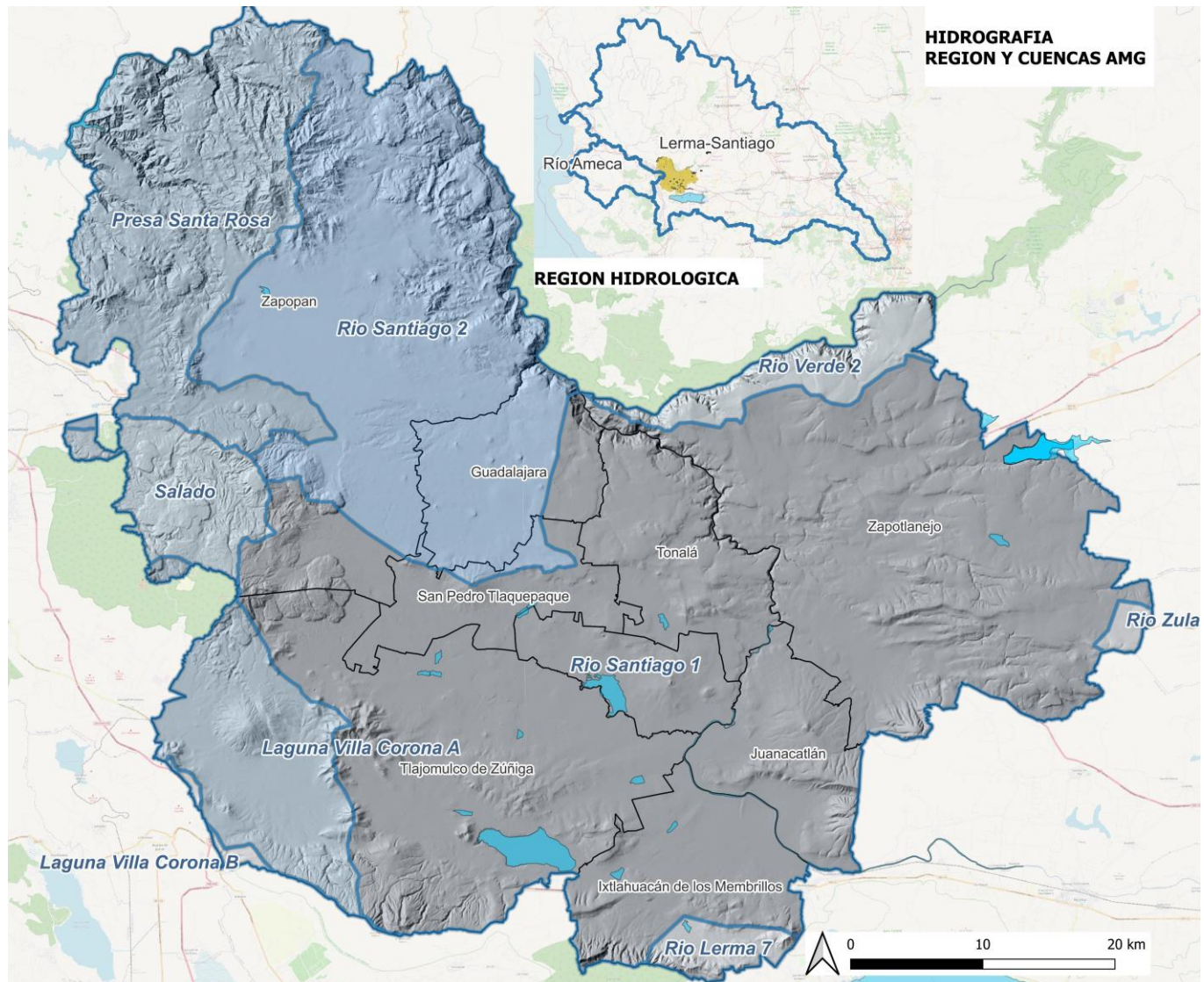


Lámina 2.10 Regiones hidrográficas y cuencas presentes en el AMG (Fuente: Elaboración propia a partir de datos de INEGI).



En la Tabla 2.9 podemos observar la superficie de la cuenca hidrográfica asociada a los tramos de los ríos principales que tienen influencia en la zona de estudio. Como puede observarse el Río Santiago es el más importante del AMG y su cuenca cubre el 74.7%.

Tabla 2.9 Hidrografía en el AMG

| Cuenca                     | Descripción                                                                                                      | Región Hidrológica | Km2  | %     |
|----------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|------|-------|
| Rio Santiago 1             | Desde la salida del Lago de Chapala, hasta la EH Las Juntas                                                      | Lerma-Santiago     | 1847 | 54.2% |
| Rio Santiago 2             | Desde donde se localiza la EH Las Juntas, hasta la EH San Cristóbal II                                           | Lerma-Santiago     | 698  | 20.5% |
| Presa Santa Rosa           | Desde donde se localiza la EH San Cristóbal II, hasta la Presa Santa Rosa                                        | Lerma-Santiago     | 415  | 12.2% |
| Laguna Villa Corona A      | Desde el nacimiento del Rio San Antonio, hasta la presa Hurtado                                                  | Lerma-Santiago     | 202  | 5.9%  |
| Salado                     | Desde el nacimiento de los ríos El Cocoliso, El Chapulimita y El Salado, hasta la estación hidrométrica La Vega. | Rio Ameca          | 106  | 3.1%  |
| Rio Verde 2                | Desde donde se localiza la EH La Cuña, hasta la confluencia del Rio Verde con el Rio Santiago                    | Lerma-Santiago     | 84   | 2.5%  |
| Rio Lerma 7                | Desde donde se localizan las EH Yurécuaro, Estanzuela y Zula, hasta su descarga en el lago de Chapala.           | Lerma-Santiago     | 35   | 1.0%  |
| Rio Zula                   | Desde su nacimiento, hasta la EH Zula.                                                                           | Lerma-Santiago     | 11   | 0.3%  |
| Laguna Villa Corona B      | Desde donde se localiza la presa Hurtado, hasta la Laguna Atotonilco                                             | Lerma-Santiago     | 9    | 0.3%  |
| EH (Estación Hidrométrica) |                                                                                                                  |                    |      |       |

## Disponibilidad de Aguas Superficiales

De las 9 cuencas hidrográficas ubicadas dentro del AMG solamente seis de ellas cuentan con disponibilidad hídrica. La tabla 2.9 muestra los datos del SINA de CONAGUA 2023. Cada fila representa una cuenca o cuerpo de agua (ríos, lagunas, presas) y se identifican los volúmenes concesionados, uso consuntivo, extracción, pérdidas por evaporación, demanda y la disponibilidad anual (av) en hectómetros cúbicos por año.

El indicador clave es av, que refleja si existe agua disponible para nuevas concesiones o si la cuenca está en déficit. Las cuencas que presentan disponibilidad positiva son el Río Verde 2, Río Santiago 1 y 2, Salado y Presa Santa Rosa, lo que significa que aún pueden otorgarse volúmenes adicionales. En contraste, otras cuencas como Río Lerma 7, Laguna Villa Corona A y B, y Río Zula muestran av negativo, indicando sobreexplotación y ausencia de disponibilidad.





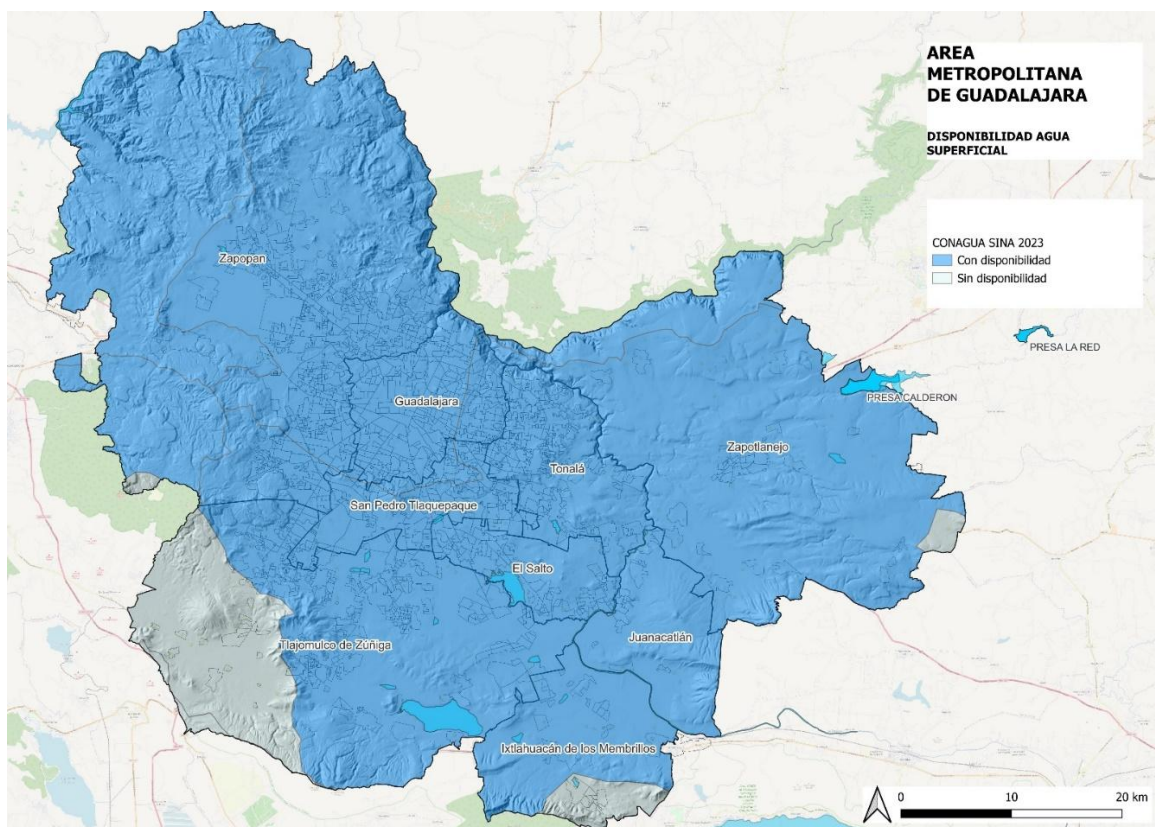


Lámina 2.11 Disponibilidad hídrica de aguas superficiales en el AMG (Fuente: Elaboración propia con datos de INEGI)

## Disponibilidad de Aguas subterráneas

El AMG se encuentra localizado sobre 13 acuíferos, destacando los acuíferos Arenal, Atemajac, Altos de Jalisco, Toluquilla, San Isidro y Cajititlán. De todos ellos solamente el acuífero Chapala cuenta con una disponibilidad apenas marginal y además la superficie es la más pequeña con apenas 14 km<sup>2</sup>. El acuífero Toluquilla es el que presenta menor disponibilidad siendo el tercer acuífero en superficie. Del total de la superficie del AMG, solo un 0.49% cuenta con disponibilidad de aguas subterránea; con un déficit acumulado total de 163.88 hm<sup>3</sup>.

La lámina 2.12 muestra la disponibilidad de agua subterránea por región según datos recabados por la CONAGUA al 2023 y se puede apreciar que los acuíferos Atemajac y Toluquilla son los que se encuentran en la zona urbanizada del AMG. Lo anterior nos permite concluir que al contar con una mayor eficiencia en el aprovechamiento del Sistema Chapala podremos controlar estos acuíferos los cuales se encuentran muy presionados.

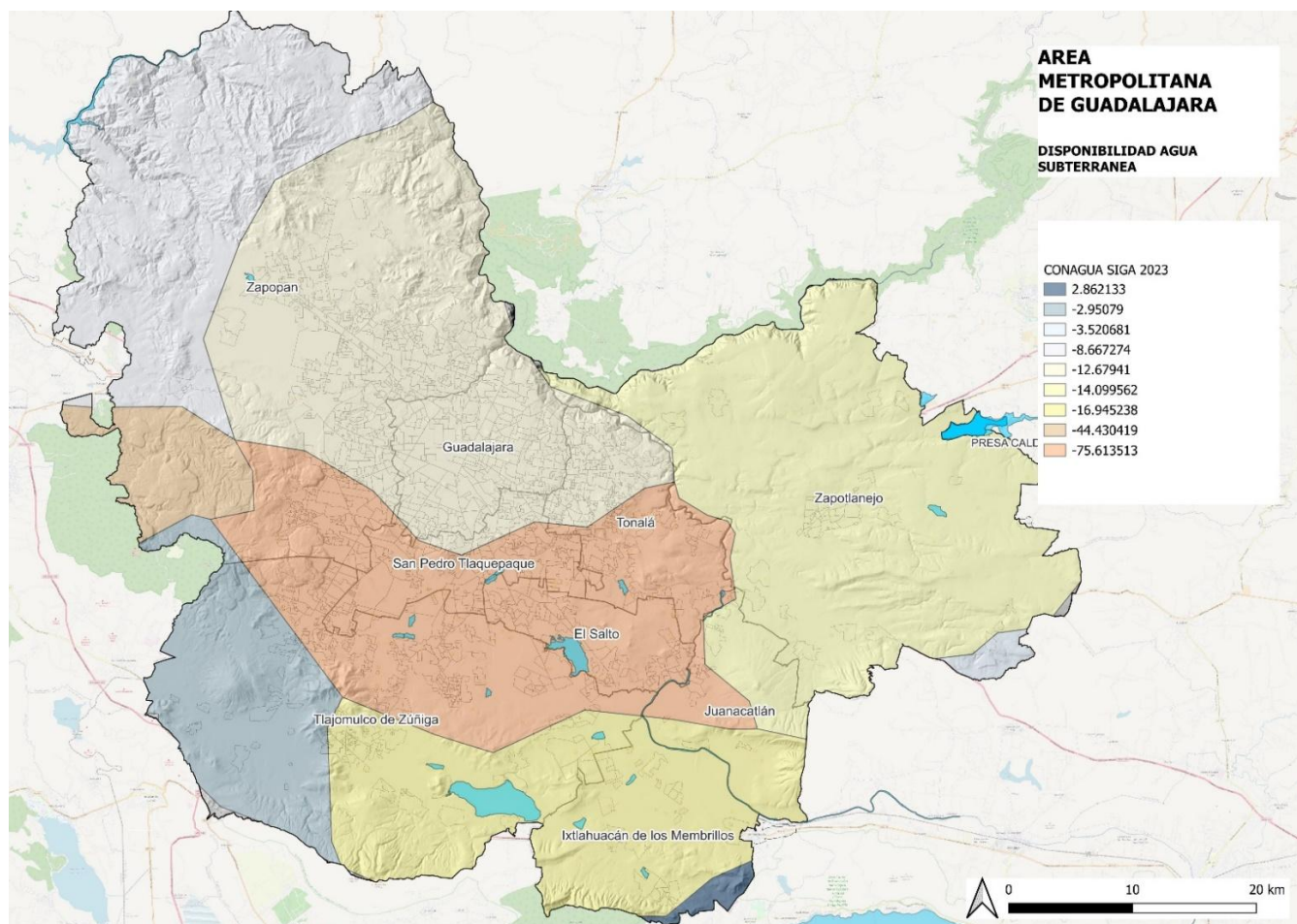


Lámina 2.12 Disponibilidad de aguas subterránea de los acuíferos localizados en el AMG (Fuente: Elaboración propia con datos de INEGI)

La tabla 2.11 corresponde a la disponibilidad de agua subterránea en acuíferos del Área Metropolitana de Guadalajara (AMG), dentro de la región Lerma–Santiago–Pacífico, en Jalisco, México. Cada acuífero se describe con volúmenes concesionados (VCAS), pendientes de registro (VAPTYR), destinados a reservas (VAPRH), extraídos (VEAS) y la disponibilidad media anual (DMA), todos en hectómetros cúbicos por año.

El indicador clave es el DMA, que muestra si aún existe agua para concesionar o si el acuífero está en déficit. Solamente el acuífero Chapala presenta un balance positivo (+2.86 hm<sup>3</sup>/año), lo que significa que conserva disponibilidad. En contraste, los demás acuíferos —San Isidro, Poncitlán, Arenal, Atemajac, Altos de Jalisco, Cajititlán, Ameca y Toluquilla— registran DMA negativo, reflejando sobreexplotación. Los casos más críticos son Toluquilla (-75.61 hm<sup>3</sup>/año) y Ameca (-

44.43 hm<sup>3</sup>/año), donde la extracción supera ampliamente la recarga natural.

*Tabla 2.11 Disponibilidad de Agua Subterránea en el AMG*

| ACUIFERO         | VCAS       | VAPTYR    | VAPRH    | VEAS       | DMA        | AREA (km <sup>2</sup> ) |
|------------------|------------|-----------|----------|------------|------------|-------------------------|
| Chapala          | 38.488082  | 0.752837  | 0.296948 | 39.537867  | 2.862133   | 14                      |
| San Isidro       | 46.256785  | 1.115593  | 0.178411 | 47.55079   | -2.95079   | 237                     |
| Ponciltán        | 32.918966  | 0.001715  | 0        | 32.920681  | -3.520681  | 16                      |
| Arenal           | 29.033274  | 0.234     | 0        | 29.267274  | -8.667274  | 470                     |
| Atemajac         | 133.368504 | 0.910906  | 0        | 134.27941  | -12.67941  | 728                     |
| Altos de Jalisco | 75.357016  | 0.442546  | 0        | 75.799562  | -14.099562 | 742                     |
| Cajititlán       | 61.838466  | 2.206771  | 0        | 64.045238  | -16.945238 | 460                     |
| Ameca            | 289.405981 | 11.424438 | 0        | 300.830419 | -44.430419 | 95                      |
| Toluquilla       | 122.074955 | 0.238558  | 0        | 122.313513 | -75.613513 | 637                     |

• VCAS: Volumen de agua ya concesionado o asignado por CONAGUA.  
 • VAPTYR: Volumen aún sin título o registro en REPDA; usos en trámite o irregulares.  
 • VAPRH: Volumen destinado a reservas, reglamentos o programación hídrica oficial.  
 • VEAS: Volumen total extraído en un acuífero; refleja la presión sobre el recurso.  
 • DMA: Disponibilidad media anual de agua subterránea.  
 • Positivo: hay agua para concesionar.  
 • Negativo: déficit, no se otorgan más volúmenes  
 Unidades en hectómetros cúbicos por año (hm<sup>3</sup>/año)

## 2.2.7. Relieve

En cuanto a los aspectos naturales del área, podemos mencionar el relieve, el cual presenta diversas formas de terreno, como colinas, mesetas o llanuras, que influyen en actividades humanas como la construcción y el diseño de infraestructuras<sup>3</sup>. Dada su complejidad, es común emplear modelos digitales de terreno para su análisis. Estos modelos permiten identificar elevaciones, medir desniveles y calcular pendientes. La lámina 2.13 representa los valores de nivel agrupados por rangos, lo que facilita la distinción entre zonas altas y bajas y contribuye a comprender la superficie. Al sur (representado en azul), encontramos las zonas más elevadas, con altitudes de hasta 2,324 metros sobre el nivel del

<sup>3</sup> Imasgal. (2032). Análisis de modelos digitales del terreno y superficies. Recuperado de [URL de Imasgal](#).



mar (msnm), mientras que al norte se ubican las áreas más bajas, con niveles de 1,082 msnm. De manera general, la mayor parte de la zona urbanizada se encuentra entre las cotas de 1500 y 1600 msnm.

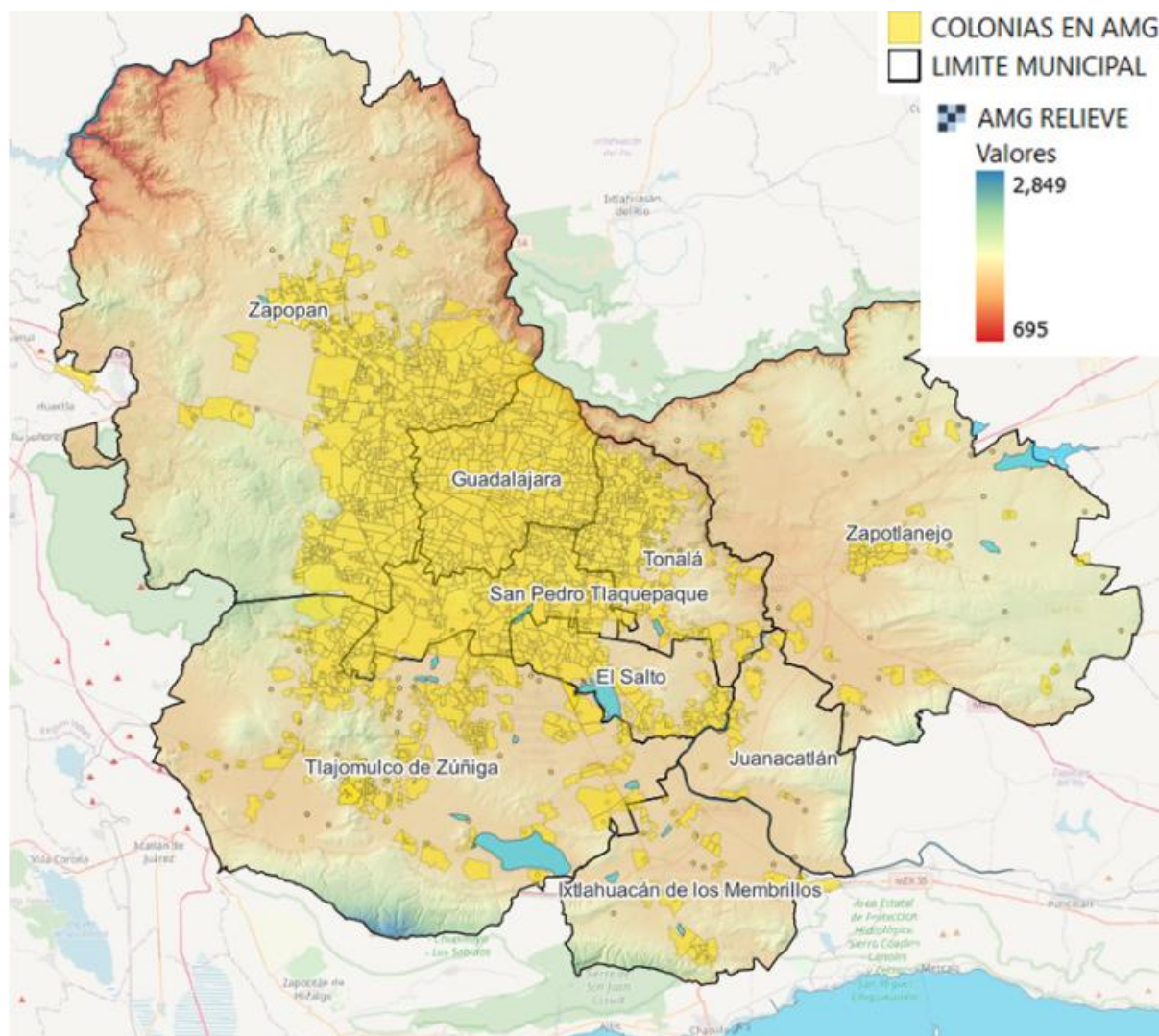


Lámina 2.13 Relieve del AMG (Fuente: Elaboración propia con datos de IMASGAL)

## 2.2.8. Análisis de Pendientes

Otro aspecto natural que considerar es el análisis de pendientes el cual evalúa la inclinación del terreno respecto a la horizontal en el espacio estudiado. En la lámina 2.14 se aprecia que las principales extensiones de pendientes accidentadas, resaltadas en el gráfico, se encuentran en la parte norte de Zapopan, al poniente de la zona urbanizada del mismo municipio, así como en la zona centro y sur de Tlajomulco de Zúñiga. Además, existen otras zonas de tamaño mediano al sur de Ixtlahuacán de los Membrillos, al este de Juanacatlán y al norte de Zapotlanejo.

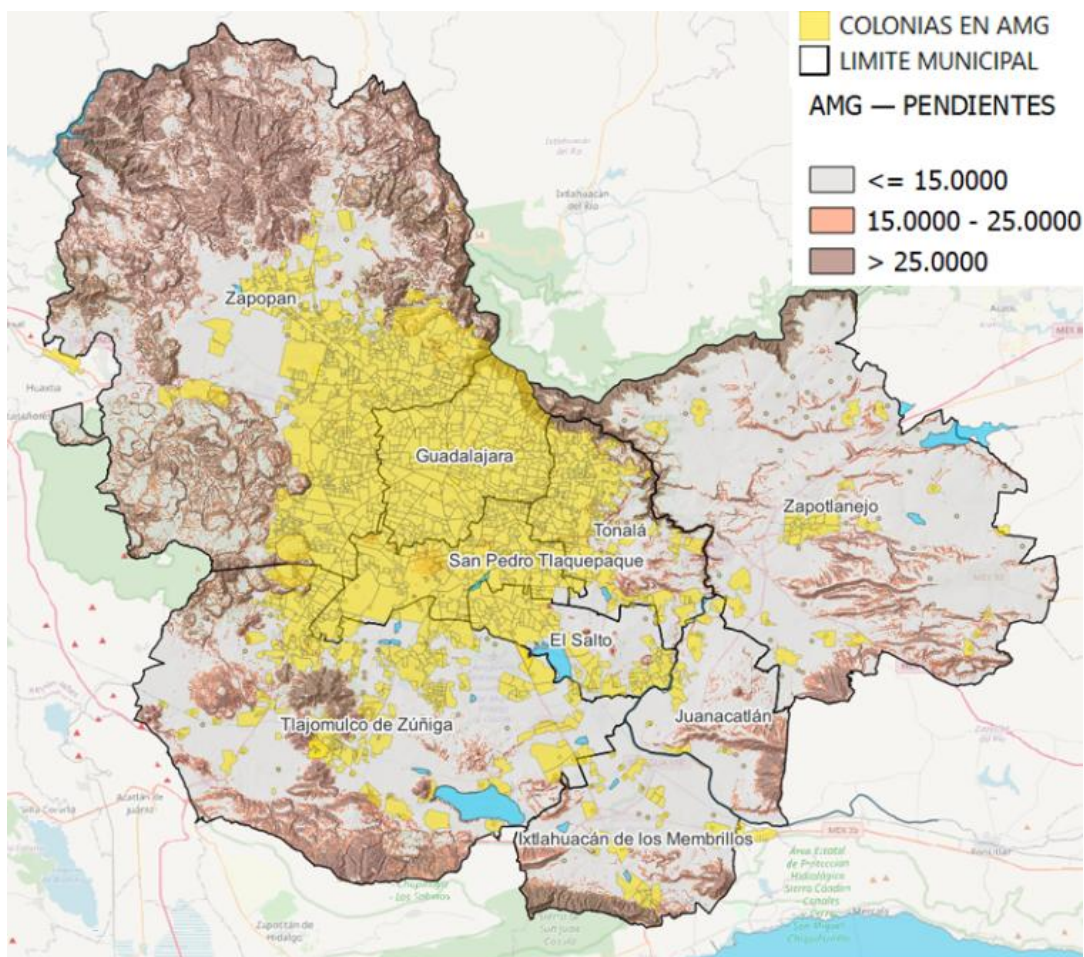


Lámina 2.14 Análisis de Pendientes del AMG (Fuente: Elaboración propia con datos de INEGI)

Las áreas rojizas con pendientes del 15% al 25% suman 11% del AMG y un 19% se presentan pendientes mayores al 25% limitando la accesibilidad y la urbanización. El 70% restante graficado en color gris tiene pendientes menores al 15% como se observa en la Tabla 2.12.

Tabla 2.12 Análisis de Pendientes en el AMG

| Rango de Pendientes | Superficie (km <sup>2</sup> ) | Porcentaje |
|---------------------|-------------------------------|------------|
| 0 a 15%             | 2,292                         | 70%        |
| 15 a 25%            | 350                           | 11%        |
| Mayor a 25%         | 623                           | 19%        |

## 2.2.9 Huella de Ciudad

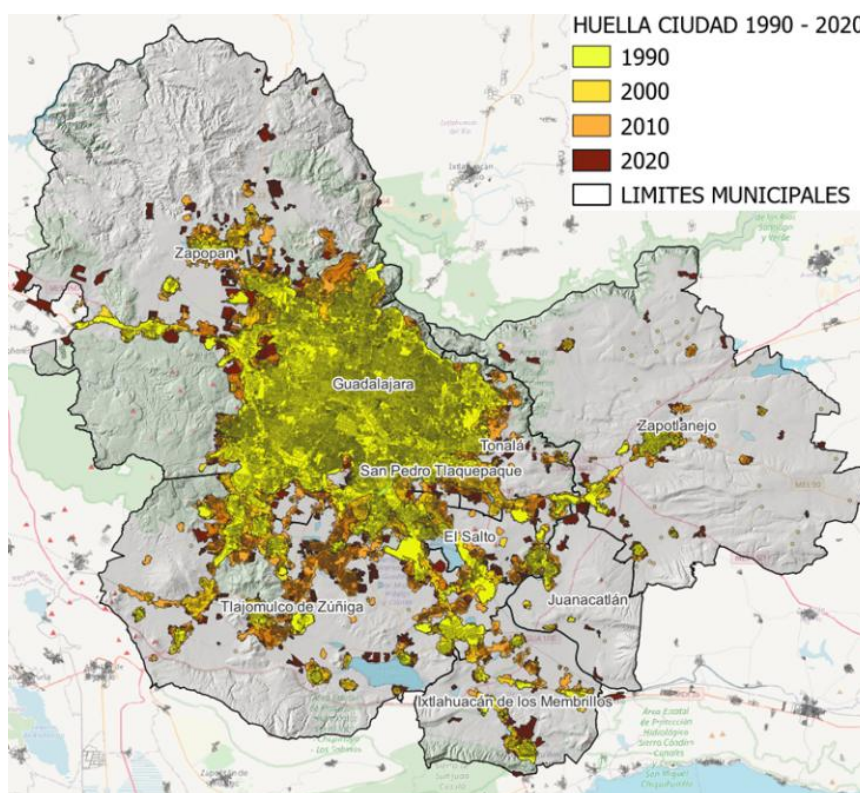
Para ampliar la visión actual del crecimiento de la ciudad resulta pertinente mirar hacia atrás y reconocer cual ha sido el crecimiento de la ciudad, es decir cuál es la huella que ha dejado su expansión. Con datos del INEGI, el IMEPLAN ha registrado



estos eventos<sup>4</sup>. La lámina 2.15 muestra la huella registrada en 1990 en amarillo, en naranja claro la del año 2000, en naranja oscuro la de 2010 y en rojo la de 2020. La Tabla 2.13 presenta datos sobre esta expansión en hectáreas durante los mismos periodos. En 1990, el área afectada era de 53,834.36 hectáreas, representado como el 100%. Para el año 2000, esta área se incrementó a 69,093.91 hectáreas, marcando un crecimiento del 128.35% con respecto al periodo anterior. En 2010 y 2020, se amplió a 82,415.07 y 115,329.55 hectáreas respectivamente, con 119.28% y 139.94% en relación con el periodo anterior. El análisis de este crecimiento proporciona una base para comprender la demanda creciente y los desafíos en la gestión del recurso hídrico en la región.

*Tabla 2.13 Superficies Urbanizadas por el Crecimiento del AMG*

| Afectación por urbanización | Superficie (has) | % Crecimiento con el periodo anterior |
|-----------------------------|------------------|---------------------------------------|
| 1990                        | 53,834.36        | 100%                                  |
| 2000                        | 69,093.91        | 128.35%                               |
| 2010                        | 82,415.07        | 119.28%                               |
| 2020                        | 115,329.55       | 139.94%                               |



*Lámina 2.15 Huella del Crecimiento de las Zonas Urbanizadas en el AMG Fuente: Elaboración propia con datos de Imeplan)*

<sup>4</sup> Orozco Ochoa, A., & Shalisko, V. (2015). *Expansión Urbana. Área Metropolitana de Guadalajara. Análisis y Prospectiva 1970 - 2045*. IMEPLAN. Recuperado en octubre 2023

En la siguiente lámina, publicada por IMEPLAN en el POTmet 2024, se muestra el cambio porcentual de población urbana entre 2010 y 2020 en el estado de Jalisco, utilizando una cuadrícula hexagonal para representar espacialmente las variaciones. La simbología temática distingue tres rangos principales: zonas con ganancias (en tonos azules), cambios marginales (en grises) y pérdidas (en rojos).

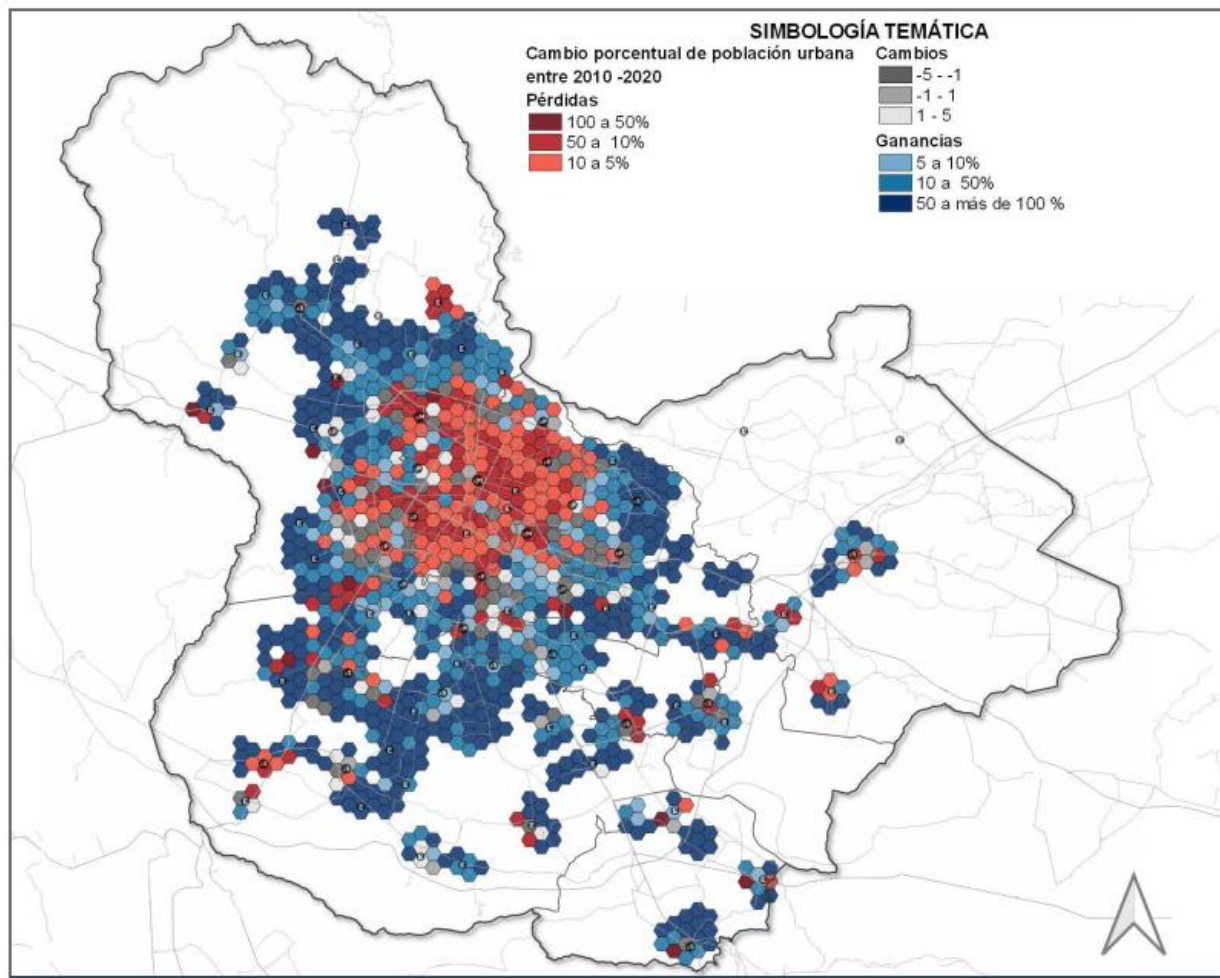


Lámina 2.16. Cambio porcentual de población urbana entre 2010 y 2020 en el estado de Jalisco (Fuente: IMEPLAN)

Las áreas en azul indican crecimiento urbano, con incrementos que van desde el 5% hasta más del 100%, destacando zonas de expansión acelerada. Las celdas grises representan estabilidad o cambios mínimos, entre -5% y +5%, lo que sugiere consolidación o estancamiento. En contraste, los tonos rojos señalan disminuciones significativas en población urbana, con pérdidas que alcanzan hasta el 100%, reflejando procesos de despoblamiento o migración hacia otras zonas metropolitanas.

Este tipo de visualización es esencial para orientar la planeación de infraestructura y servicios públicos, ya que permite identificar dónde se deben priorizar inversiones en movilidad, equipamientos urbanos y, de manera crítica, en sistemas de abastecimiento de agua. Las zonas de crecimiento sostenido demandan nuevas redes hidráulicas, plantas de tratamiento y sistemas de distribución capaces de garantizar el acceso equitativo al recurso. En contraste, las áreas en pérdida poblacional requieren estrategias de reconversión y mantenimiento que eviten infraestructuras sobredimensionadas.



En conjunto, la lectura territorial vinculada al abastecimiento de agua asegura que el desarrollo urbano sea sostenible, equilibrado y resiliente frente a las variaciones demográficas

## 2.2.10 Escenario Tendencial de Crecimiento

Es igualmente oportuno revisar la huella del pasado como reconocer el escenario tendencial de crecimiento del AMG. La lámina 2.17 muestra en color morado las áreas donde se prevé la nueva expansión para 2045<sup>5</sup>, revelando principalmente su ocurrencia al norte, este y sur del AMG. Es esencialmente una proyección, basada en tendencias históricas y actuales de población, uso del suelo, movilidad, industria y medio ambiente.

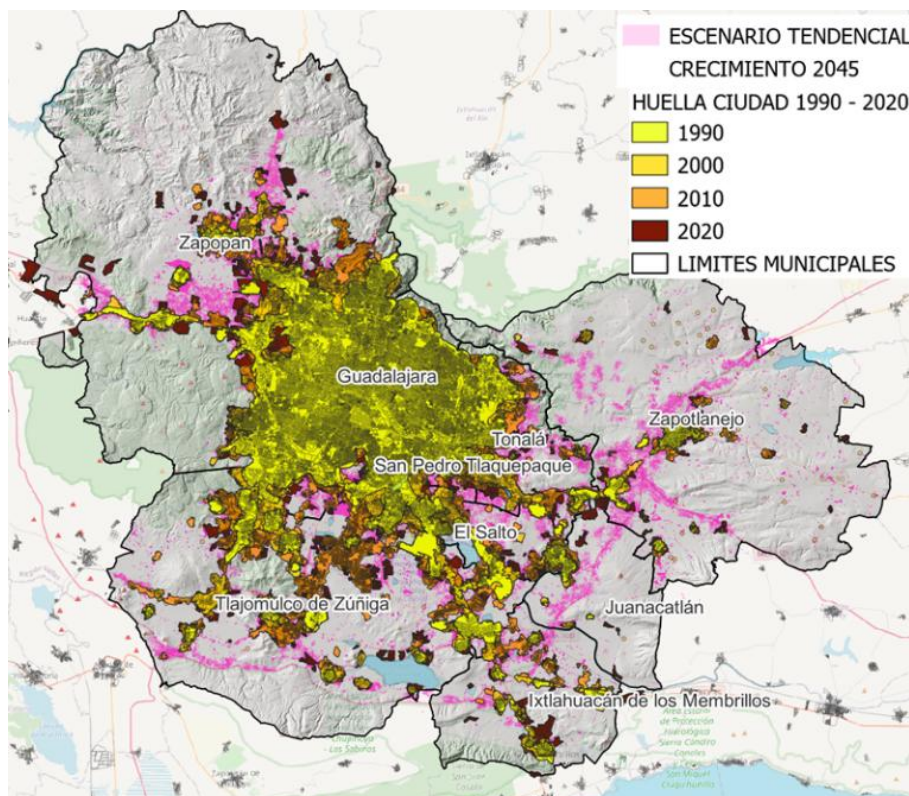


Lámina 2.17 Escenario tendencial 2045 (Fuente: Elaboración propia con datos de Imeplan)

Se estima que para 2045, el AMG se expandirá territorialmente a 1,350 km<sup>2</sup>, desde los 1,153 km<sup>2</sup> de 2020. Esto se puede visualizar en la Tabla 2.14.

Tabla 2.14 Escenario tendencial de crecimiento

| AFECCIÓN POR URBANIZACIÓN | ÁREA HAS | % CRECIMIENTO CON EL PERÍODO ANTERIOR |
|---------------------------|----------|---------------------------------------|
|---------------------------|----------|---------------------------------------|

<sup>5</sup> Instituto Metropolitano de Planeación (IMEPLAN). (2016). *Plan de Ordenamiento Territorial Metropolitano del Área Metropolitana de Guadalajara (POTmet)*. [Recuperado en septiembre 2023, de IMEPLAN<sup>1</sup>](#).

|                 |            |         |
|-----------------|------------|---------|
| 1990            | 53,834.36  | 100%    |
| 2000            | 69,093.91  | 128.35% |
| 2010            | 82,415.07  | 119.28% |
| 2020            | 115,329.55 | 139.94% |
| Estimación 2045 | 134,976.00 | 117.04% |

## 2.2.11 Utilización de Suelo y Zonificación Primaria

El uso general del suelo es la forma en que se clasifica y regula el territorio según las actividades que se pueden realizar en él. La zonificación primaria es la determinación de las áreas que integran y delimitan un centro de población, según sus características y funciones. Esta determinación se realiza en los Programas de Desarrollo Urbano (PDU) y Parciales (PPDU) de cada municipio, que establecen los usos de suelo permitidos<sup>6</sup>.

La determinación de estos usos impacta directamente en la demanda de recursos hídricos. Los componentes de esta zonificación se aprecian en la lámina 2.18 donde en color magenta se aprecian grandes corredores que marcan la tendencia del crecimiento de las zonas de urbanización en el AMG las cuales se presentan hacia la zona sur poniente y suroriente principalmente.

<sup>6</sup> Instituto Metropolitano de Planeación (IMEPLAN). (n.d.). SIGmetro: Sistema de Información y Gestión Metropolitana.

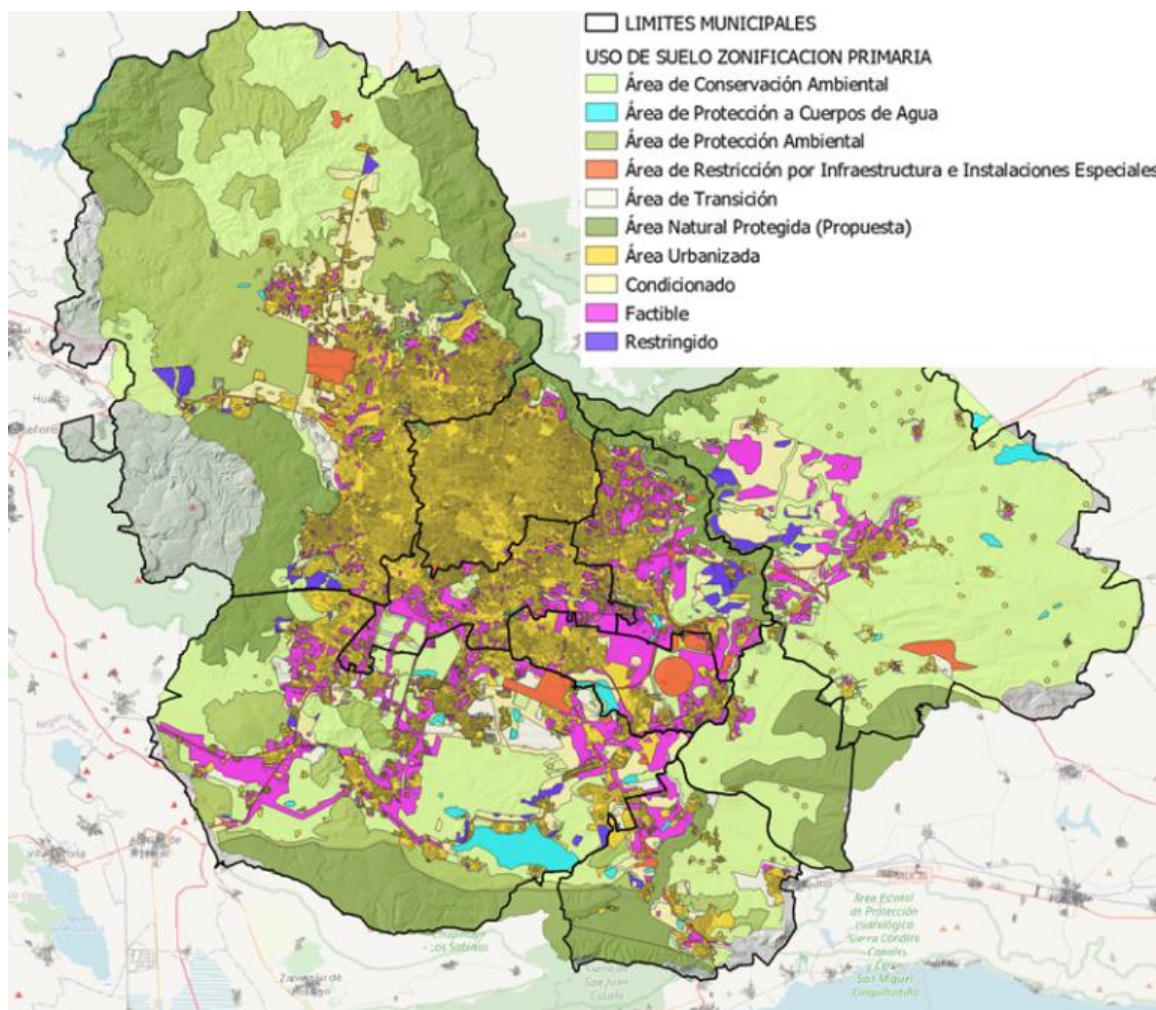


Lámina 2.18 Zonificación primaria del AMG Fuente: Elaboración propia con datos de Imeplan)

Al cuantificar la extensión de esta clasificación podemos mencionar que destacan 1095.3 km<sup>2</sup> como Área de Conservación Ambiental lo cual representa el 34%, 35.7 km<sup>2</sup> de zonas de Protección a Cuerpos de Agua que equivale apenas al 1% y 351.1 km<sup>2</sup> de Áreas de Protección Ambiental que suma el 11%. Se proponen 48.1 km<sup>2</sup> para Zonas de Restricción por Infraestructura e Instalaciones Especiales (1%) y 51.7 km<sup>2</sup> como Área de Transición (2%). Las Áreas Naturales Protegidas suman 596.5 km<sup>2</sup> correspondiente al 18%. Del total, 647.1 km<sup>2</sup> están urbanizados (20%), 237.0 km<sup>2</sup> son factibles para desarrollo urbano (7%), 171.8 km<sup>2</sup> tienen uso condicionado a la actividad humana (5%), y 31.3 km<sup>2</sup> están restringidos a la actividad humana (1%). Esto se puede visualizar en la Tabla 2.15

Tabla 2.15 Superficies de Zonificación Primaria del AMG

| ZONIFICACION PRIMARIA          | Área (km <sup>2</sup> ) | %   |
|--------------------------------|-------------------------|-----|
| Área de Conservación Ambiental | 1095.3                  | 34% |



|                                                                    |       |     |
|--------------------------------------------------------------------|-------|-----|
| Área de Protección a Cuerpos de Agua                               | 35.7  | 1%  |
| Área de Protección Ambiental                                       | 351.1 | 11% |
| Área de Restricción por Infraestructura e Instalaciones Especiales | 48.1  | 1%  |
| Área de Transición                                                 | 51.7  | 2%  |
| Área Natural Protegida (Propuesta)                                 | 596.5 | 18% |
| Área Urbanizada                                                    | 647.1 | 20% |
| Factible para Desarrollo urbano                                    | 237.0 | 7%  |
| Uso Condicionado a la Actividad Humana                             | 171.8 | 5%  |
| Uso Restringido a la Actividad Humana                              | 31.3  | 1%  |

La importancia de planear el abasto de agua en este contexto es que el aumento de la población y la expansión urbana generan una mayor demanda de agua potable, que puede superar la oferta disponible y provocar problemas de escasez, contaminación y conflictos por el uso del recurso. Por eso, se necesita una visión futura sobre los mejores aprovechamientos de las concesiones disponibles del agua potable mediante la optimización de la infraestructura para hacer frente al crecimiento poblacional, y además políticas públicas que fomenten la eficiencia, la equidad, la calidad y la sustentabilidad del servicio.

## 2.2.12 Utilización de Suelo y Macro perspectiva

La macro perspectiva en el uso de suelo del AMG es la visión general y estratégica que se tiene del territorio metropolitano, considerando sus características físicas, sociales, económicas y ambientales, así como sus potencialidades y problemáticas. Sus componentes están basados en los instrumentos de planeación urbana de cada municipio, como los Programas de Desarrollo Urbano (PDU) y Parciales (PPDU). Sus componentes se muestran en la lámina 2.19.

Es importante tener presente que este aspecto busca orientar el desarrollo urbano hacia un modelo de AMG más sostenible, equitativo y competitivo, que respete la diversidad y la identidad de cada municipio y que promueva la integración y la coordinación entre ellos.

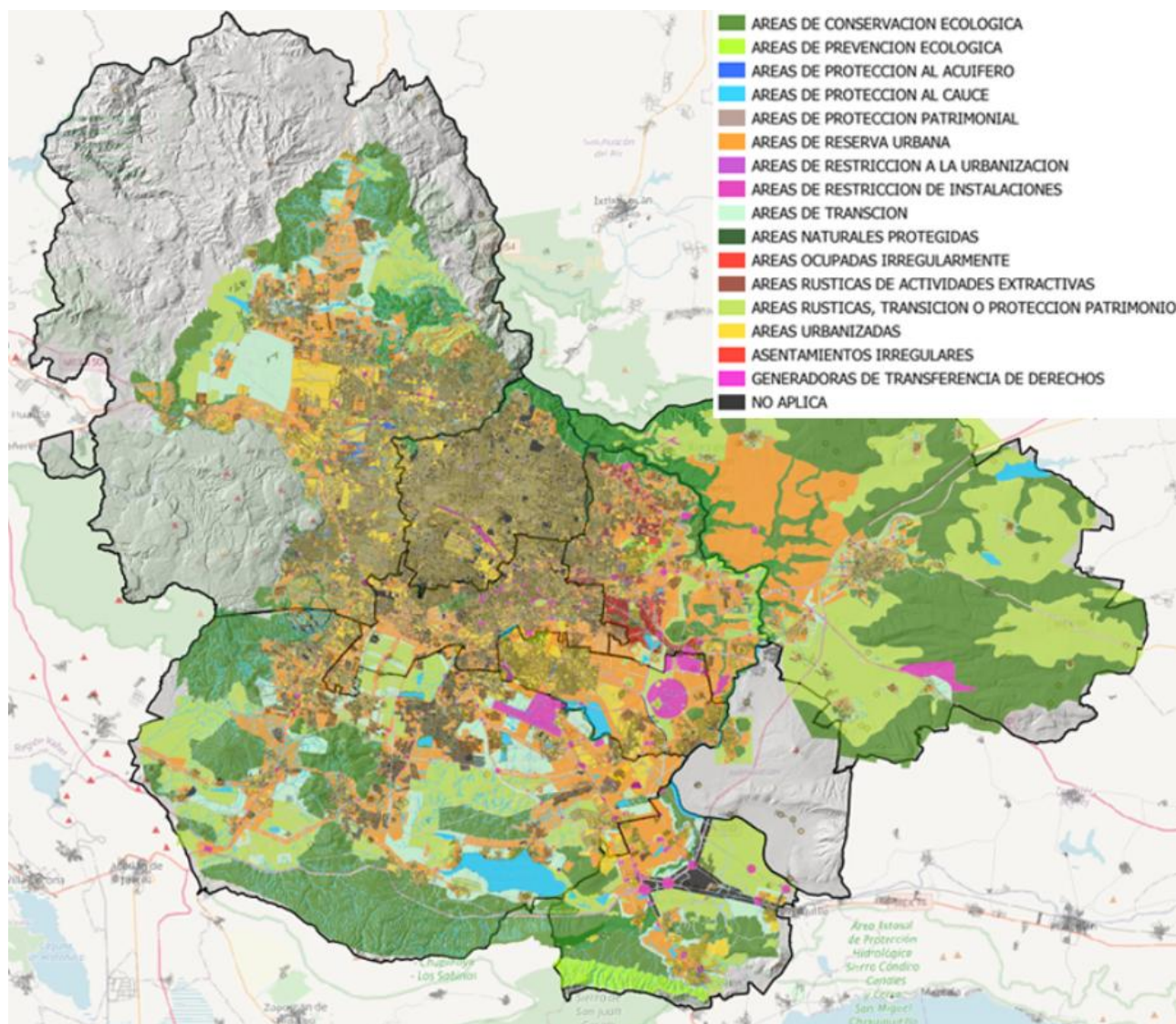


Lámina 2.19 Macro perspectiva en el uso de suelo Fuente: Elaboración propia con datos de Imeplan)

La cuantificación de la extensión de estas superficies se aprecia en la Tabla 2.16 donde resaltan las áreas de conservación ecológica que constituyen el mayor porcentaje del territorio, abarcando un 26% y ocupando 622.03 km<sup>2</sup>. Le siguen las áreas de reserva urbana, que representan el 19% del área total con 438.06 km<sup>2</sup>, y las áreas rústicas, de transición o protección patrimonial, que cubren el 18% del territorio con 430.38 km<sup>2</sup>. Las áreas urbanizadas representan el 17% del área total, abarcando 391.93 km<sup>2</sup>. Además, las áreas de protección al cauce ocupan el 6% del área total con 135.09 km<sup>2</sup>. Las áreas de restricción de instalaciones y las áreas naturales protegidas comparten el 4% del territorio, con 44.28 km<sup>2</sup> y 88.43 km<sup>2</sup>, respectivamente. Finalmente, los asentamientos irregulares y las áreas de prevención ecológica ocupan cada uno el 1% del territorio, con 13.45 km<sup>2</sup> y 19.88 km<sup>2</sup>, respectivamente.

*Tabla 2.16 Cuantificación en los usos de suelo zonificación secundaria*

| DESCRIPCIÓN                                        | ÁREA km <sup>2</sup> | %   |
|----------------------------------------------------|----------------------|-----|
| Áreas de reserva urbana                            | 438.06               | 19% |
| Áreas de transición                                | 127.22               | 5%  |
| Áreas ocupadas irregularmente                      | 0.13                 | 0%  |
| Áreas urbanizadas                                  | 391.93               | 17% |
| Áreas rústicas de actividades extractivas          | 0.37                 | 0%  |
| Áreas de prevención ecológica                      | 19.88                | 1%  |
| Generadoras de transferencia de derechos           | 0.19                 | 0%  |
| Asentamientos irregulares                          | 13.45                | 1%  |
| Áreas de protección patrimonial                    | 4.88                 | 0%  |
| Áreas rústicas, transición o protección patrimonio | 430.38               | 18% |
| No aplica                                          | 37.06                | 2%  |
| Áreas de protección al cauce                       | 135.09               | 6%  |
| Áreas de restricción a la urbanización             | 0.09                 | 0%  |
| Áreas de protección al acuífero                    | 1.09                 | 0%  |
| Áreas de conservación ecológica                    | 622.03               | 26% |
| Áreas de restricción de instalaciones              | 44.28                | 2%  |
| Áreas naturales protegidas                         | 88.43                | 4%  |

### 2.2.13 Vialidades y Conectividad Urbana

La conectividad vial del Área Metropolitana de Guadalajara (AMG) se considera como el eje estratégico para articular la dinámica urbana, rural y económica de la región. El sistema de transporte y vías de comunicación enlaza centralidades y localidades, permitiendo la movilidad de personas y mercancías, así como el intercambio de bienes y servicios.

Debido a la extensión y posición geográfica del AMG, coinciden varias vialidades de jerarquía regional y primaria, las cuales funcionan como ejes de la movilidad metropolitana.

Este sistema refleja la magnitud y jerarquía de las vías que sostienen la movilidad metropolitana. En total, la red suma 3,204 kilómetros, distribuidos en cuatro tipos principales. La vialidad secundaria concentra la mayor extensión con 1,650 km (51%), lo que evidencia su papel como soporte cotidiano de la movilidad interna y de conexión entre localidades. Le sigue la vialidad primaria, con 945 km (29%), que articula los flujos principales hacia las centralidades urbanas y suburbanas.

La vialidad regional, con 391 km (12%), cumple una función estratégica al vincular el AMG con municipios y zonas rurales de influencia, mientras que la vialidad federal, con 218 km (7%), asegura la conexión con corredores nacionales y rutas de largo alcance.

Por su condición de superficie urbanizada y destino histórico de las principales obras de la ciudad, Guadalajara es el municipio con mayor número de kilómetros lineales de vialidades primarias. Le sigue Zapopan, con una cifra muy similar. Por el contrario,



Ixtlahuacán de los Membrillos es el municipio con menor longitud de vialidades primarias, con apenas 7 km, lo que evidencia su nivel de baja consolidación en términos urbanísticos.

El sistema vial primario estructura la movilidad de la población con alcance metropolitano y conecta la ciudad con el sistema regional de ciudades, por lo que es importante contar con una cobertura mucho más equilibrada y jerarquizada en función de las principales actividades de la ciudad. La estructura vial existente se presenta discontinua, concentrada en la ciudad central y desestructurada en función de las necesidades de movilidad de la población, lo cual significa un reto importante para consolidarla e intensificar equilibradamente su utilización. En la lámina 2.20 se observa gráficamente las vialidades principales de la AMG y en la tabla 2.17 se puede visualizar las longitudes de los tipos de vialidades presentes.

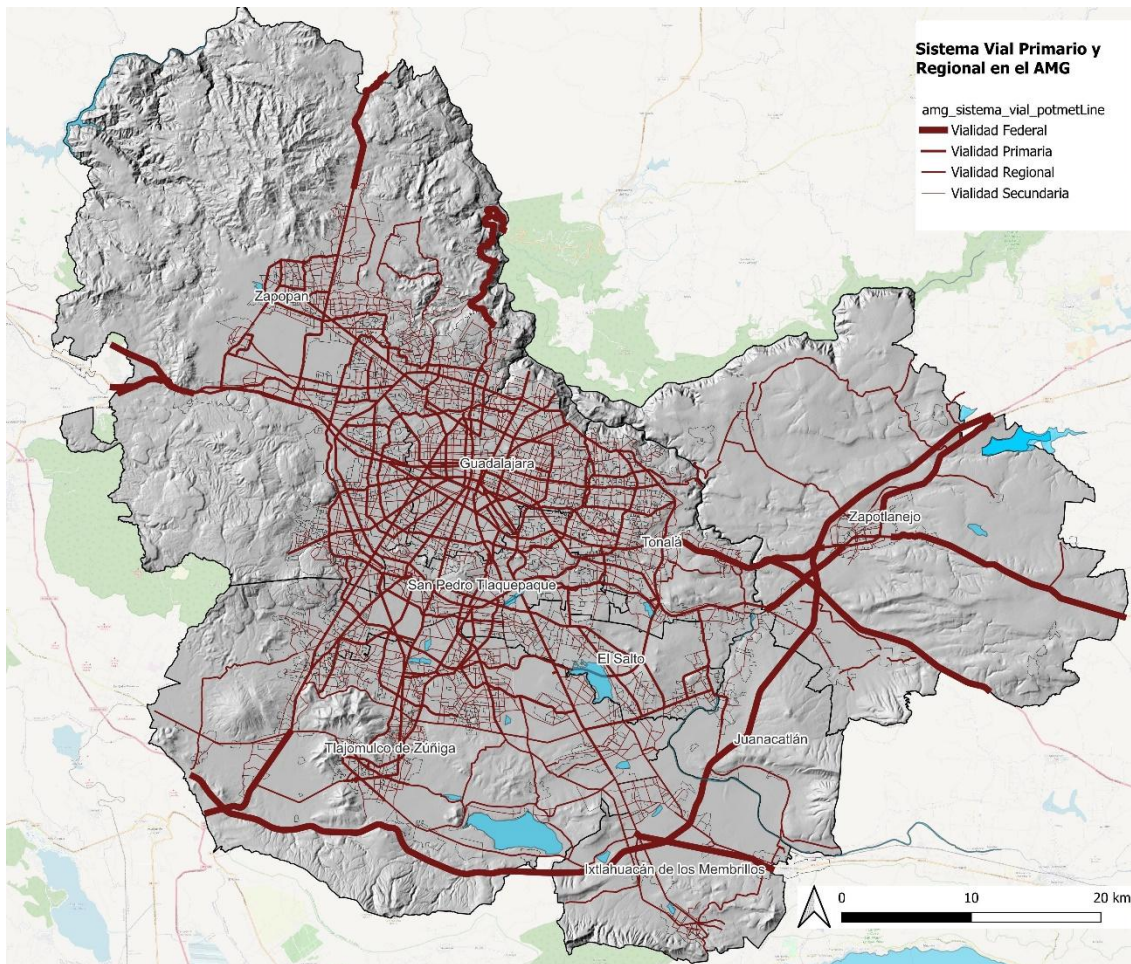


Lámina 2.20 Vialidades principales del AMG (Fuente: Elaboración propia a partir de datos obtenidos del POTMet, IMEPLAN)

Tabla 2.17 Longitud de vialidades primarias y regionales en el AMG (Fuente: POTMet, IMAPLAN)

| SISTEMA VIAL AMG |
|------------------|
|------------------|

| TIPO                | LONGITUD<br>(km) | %           |
|---------------------|------------------|-------------|
| Vialidad Regional   | 391              | 12%         |
| Vialidad Secundaria | 1650             | 51%         |
| Vialidad Federal    | 218              | 7%          |
| Vialidad Primaria   | 945              | 29%         |
| <b>TOTAL</b>        | <b>3,204</b>     | <b>100%</b> |

Por otro lado, es relevante mencionar que persisten contrastes en esta red: mientras algunas zonas muestran alta integración al continuo urbano, otras presentan baja conectividad, lo que limita su consolidación y genera desigualdades en accesibilidad. En este sentido podemos mencionar que el Sistema Vial Primario Regional muestra la extensión y características de las vialidades en el AMG, diferenciando entre tramos consolidados, existentes y propuestos.

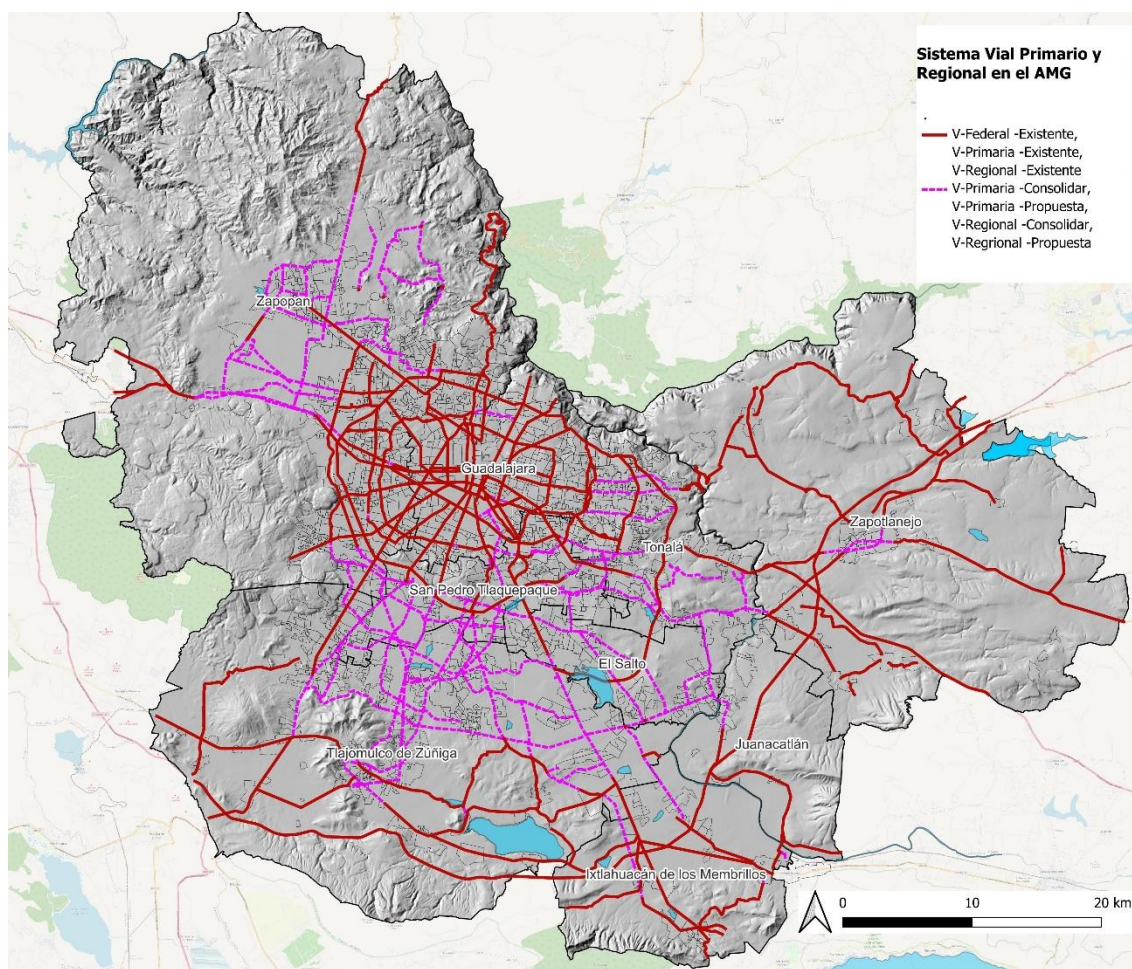


Lámina 2.21 Sistema vial primario y regional en el AMG.

- En el apartado **consolidar**, se registran 78.57 km de vialidad regional, 308.20 km primaria y 576.30 km secundaria, reflejando la necesidad de reforzar su integración.



- En el rubro **existente**, las cifras son mayores: 283.31 km regionales, 473.65 km primarias y 719.43 km secundarias, además de 218.28 km federales, lo que evidencia la base actual de conectividad que sostiene la movilidad metropolitana.
- Finalmente, en el bloque **propuesta**, se contemplan 29.60 km regionales, 163.56 km primarias y 354.74 km secundarias, que representan la expansión planificada para mejorar la cobertura y eficiencia del sistema.



Esta tabla facilita comprender la conectividad vial del AMG.

*Tabla 2.18 Sistema vial primario regional del AMG.*

| <b>Sistema Vial Primario Regional</b> |                   |          |                       |
|---------------------------------------|-------------------|----------|-----------------------|
| <b>Tipo de Vialidad</b>               | <b>Long (Kms)</b> | <b>%</b> | <b>Característica</b> |
| Regional                              | 78.57             | 30%      | Consolidar            |
| Primaria                              | 308.208           |          |                       |
| Secundaria                            | 576.302           |          |                       |
| Federal                               | 218.286           | 53%      | Existente             |
| Regional                              | 283.316           |          |                       |
| Primaria                              | 473.656           |          |                       |
| Secundaria                            | 719.435           | 17%      | Propuesta             |
| Regional                              | 29.604            |          |                       |
| Primaria                              | 163.565           |          |                       |
| Secundaria                            | 354.743           |          |                       |

Este análisis de la conectividad vial no solo orienta la movilidad territorial, sino que también permite identificar zonas prioritarias para el impulso de infraestructura básica, como el abastecimiento de agua. Las vialidades regionales y secundarias, al vincular áreas rurales y suburbanas con el continuo urbano, facilitan la localización y operación de redes hidráulicas, plantas de tratamiento y sistemas de distribución. En zonas con baja conectividad, reforzar la infraestructura vial puede ser el primer paso para garantizar el acceso equitativo a servicios hídricos, especialmente en contextos de expansión urbana o déficit histórico. Así, la planeación vial se convierte en una herramienta clave para articular movilidad, habitabilidad y sostenibilidad hídrica.

Las mejores condiciones de conectividad regional se presentan hacia el sur-suroriente de la ciudad, justo donde es más evidente la dispersión urbana de los últimos años. Esto nos dice que la conectividad vial es un detonador del crecimiento urbano, por lo que la dotación de infraestructura vial (primaria y regional), debe utilizarse como orientador del crecimiento de la ciudad; siempre debe ir acompañada de estrategias puntuales de consolidación urbana para evitar el fenómeno de dispersión. Sin duda, los instrumentos de planeación urbana municipal serán aliados importantes en la búsqueda de tales objetivos.

La lámina 2.22 muestra el grado de conectividad del área metropolitana de Guadalajara en donde el color rojo muestra las zonas con mayor conectividad y el color azul con menor conectividad.

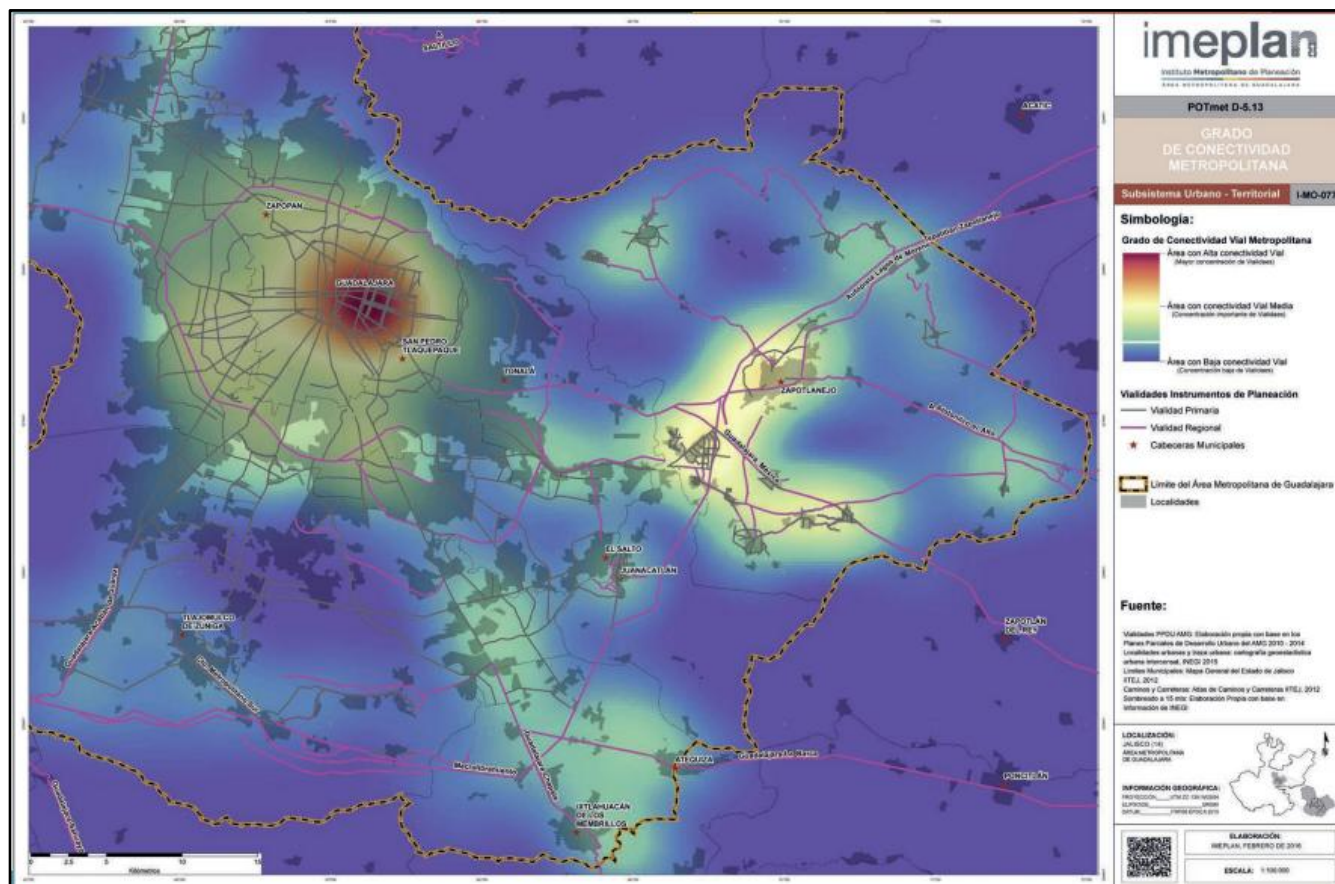


Lámina 2.22 Grado de conectividad del AMG (Fuente: POTMet, IMEPLAN 2016)

La red ferroviaria de cercanías en el AMG tiene una longitud de 1,472 km y cruza 6 municipios. Los municipios con mayor longitud de esta red son Tlajomulco de Zúñiga con 38.8 km y Zapopan con 27.1 km. Lo anterior se puede visualizar en la Lámina 2.20 y se debe a la conexión con el puerto de Manzanillo, al Norte con punto final Nogales, Sonora y al Sur con la ciudad de México.

Por su parte, el aeropuerto de Guadalajara se encuentra a 17 kilómetros al sur de la ciudad y a 15 kilómetros al norte de Chapala. Ofrece 836 frecuencias semanales a 48 destinos: 26 nacionales, 21 a Estados Unidos y Ciudad de Panamá. En diciembre de 2015 se transportaron a 616.6 miles de pasajeros. Se puede observar la ubicación del Aeropuerto en la lámina 2.20 el cual se ubica en el Municipio de Tlajomulco de Zúñiga. Es importante mencionar que actualmente el Aeropuerto cuenta con planes de crecimiento.

En el AMG existen 4 terminales de autobús. La más grande y de mayor movimiento es la Nueva Central Camionera, ubicada en San Pedro Tlaquepaque. Este municipio también cuenta con la Central Tlaquepaque que ofrece, principalmente, salidas hacia el sur del Estado. En Zapopan se encuentra la Central Zapopan, al cruce de Av. Vallarta y Av. Aviación, la cual sirve

principalmente a las rutas de Puerto Vallarta y el Noroeste del país. En el centro de Guadalajara aún funciona la Central Vieja, la cual da servicio a localidades cercanas al AMG.

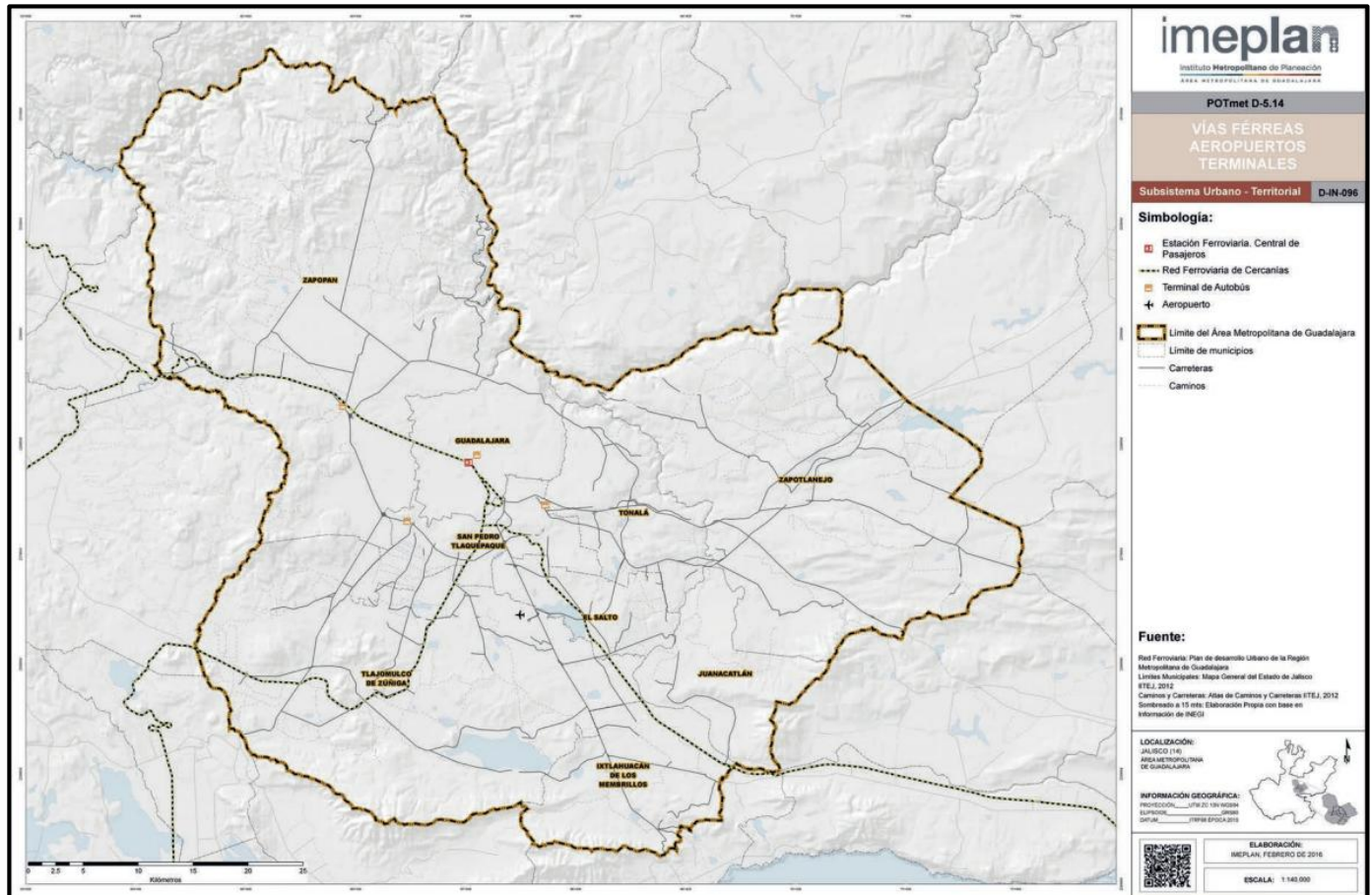


Lámina 2.23 Vías férreas, aeropuertos y terminales (Fuente: POTMet, IMEPLAN 2016)

La superficie de cobertura de transporte público colectivo y masivo para el área urbana del AMG es de 53,031 ha. Zapopan concentra la mayor superficie cubierta cuenta con 16,281 ha, sin embargo, esto apenas representa el 74% de su territorio. Guadalajara es el municipio con mayor porcentaje cubierto de acuerdo con su superficie urbana, con el 99%. Por su parte, Ixtlahuacán de los Membrillos y Juanacatlán son los que menor porcentaje y superficie tienen con cobertura de transporte público en su área urbana, con 7 y 25%, respectivamente. Los datos anteriores se muestran en la lámina 2.24 y la tabla 2.19.



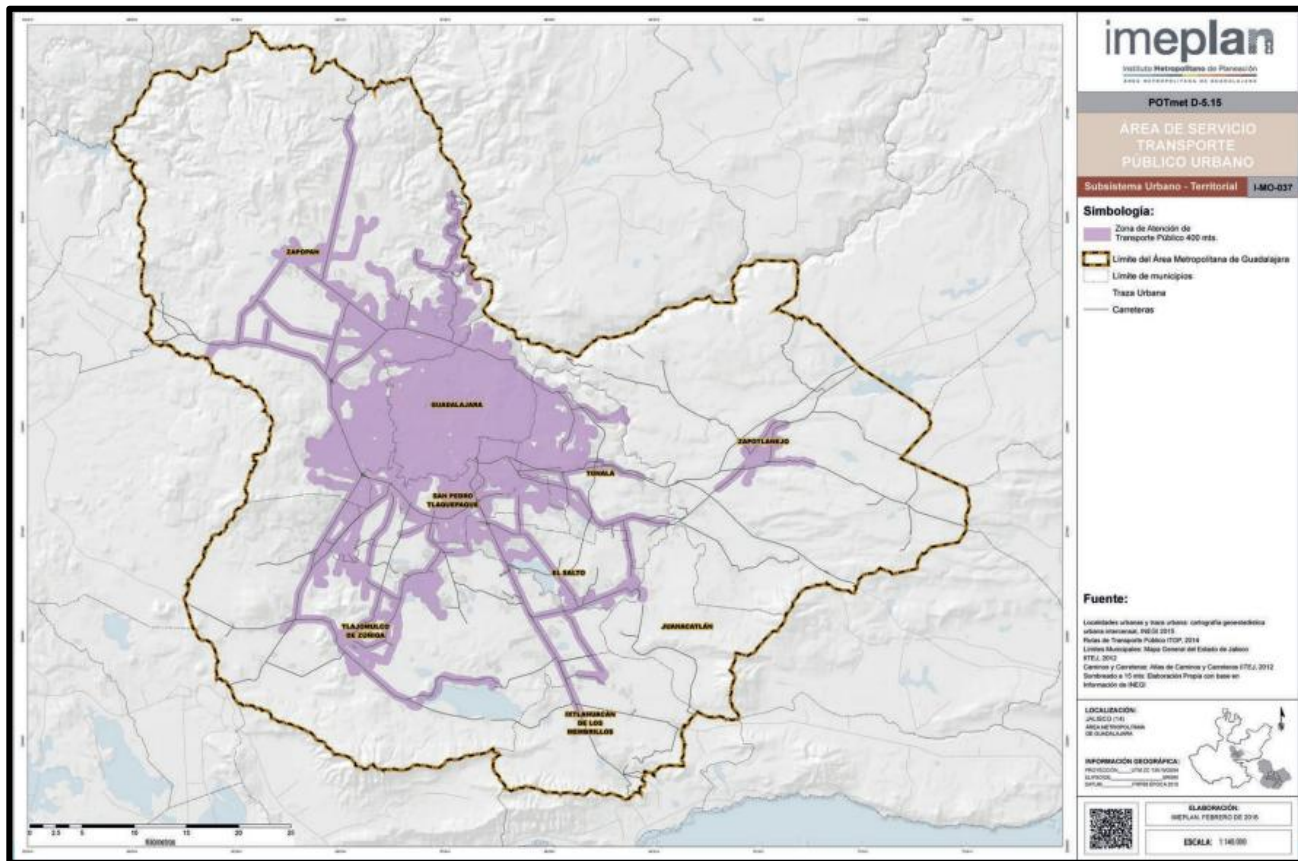


Lámina 2.24 Cobertura de transporte público del AMG (Fuente: POTMet, IMEPLAN 2016)

Tabla 2.19 Cobertura de transporte público en el AMG (fuente: POTMet, IMEPLAN 2016)

| COBERTURA DE TRANSPORTE PÚBLICO EN EL AMG EN HECTÁREAS. |               |               |                         |
|---------------------------------------------------------|---------------|---------------|-------------------------|
| MUNICIPIO                                               | CON COBERTURA | SIN COBERTURA | PORCENTAJE DE COBERTURA |
| Guadalajara                                             | 13,646        | 169           | 99%                     |
| San Pedro Tlaquepaque                                   | 7,606         | 963           | 89%                     |
| Tonalá                                                  | 5,356         | 1,368         | 80%                     |
| Zapopan                                                 | 16,281        | 5,848         | 74%                     |
| El Salto                                                | 2,948         | 1,456         | 67%                     |
| Tlajomulco de Zúñiga                                    | 5,909         | 5,802         | 50%                     |
| Zapotlanejo                                             | 1,004         | 1,279         | 44%                     |
| Juanacatlán                                             | 108           | 324           | 25%                     |
| Ixtlahuacán de los Membrillos                           | 172           | 2,223         | 7%                      |

## 2.2.14. Aspectos sociales y económicos

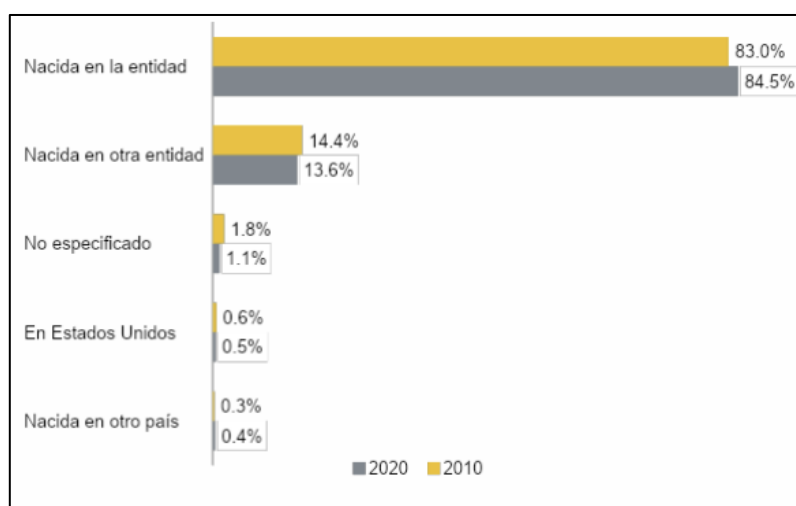
La dinámica de urbanización expansiva y dispersa a lo largo de los 9 territorios municipales que conforman el AMG, se ha distinguido por ser socialmente excluyente y por impactar negativamente sobre la dinámica económica del conjunto metropolitano. Las dinámicas poblacionales observadas al interior del AMG, mismas que derivaron en un crítico despoblamiento de su municipio central y el acelerado poblamiento del resto de los territorios municipales, particularmente los ubicados en su periferia, favorecieron la proliferación de asentamientos de origen irregular y de los más diversos fenómenos como la pobreza y marginación social.

Las dinámicas poblacionales observadas al interior del AMG, mismas que derivaron en un crítico despoblamiento de su municipio central y el acelerado poblamiento del resto de los territorios municipales, particularmente los ubicados en su periferia, favorecieron la proliferación de asentamientos de origen irregular y de los más diversos fenómenos como la pobreza y marginación social.

### 2.2.14.1. Intensidad migratoria

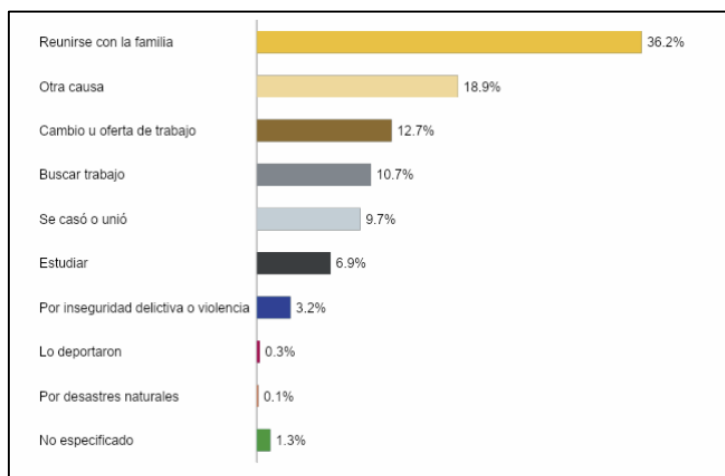
El estado de Jalisco tiene una añeja tradición migratoria a Estados Unidos que se remonta hacia los finales del siglo XIX. Se estima que 1.4 millones de personas nacidas en Jalisco habitan en Estados Unidos y que alrededor de 2.6 millones de personas nacidas en aquel país son hijos de padres jaliscienses. Según el índice de intensidad migratoria calculado por Consejo Nacional de Población (CONAPO) con datos del censo de población de 2020 del INEGI, Jalisco tiene un grado alto de intensidad migratoria, y tiene el lugar decimotercero entre las entidades federativas del país con mayor intensidad migratoria.

Conforme a datos del Censo de 2020, el 0.9% de la población residente del AMG son extranjeros, es decir, 43 mil 932 habitantes; de ellos, 24 mil 520 personas nacieron en Estados Unidos de América (0.5%) y 19 mil 412 en otros países (0.4%). Asimismo, destaca que el 13.6% de la población de los municipios de esta Área Metropolitana, eran migrantes de otras entidades federativas del país. Lo anterior se puede visualizar en la Figura 2.3



*Figura 2.3 Porcentaje de población del Área Metropolitana de Guadalajara por lugar de nacimiento en el AMG  
(Análisis General del Área Metropolitana de Guadalajara, IIEG, 2020)*

Es importante mencionar que el censo del 2020 captó las causas por las que las personas deciden migrar. Entre las principales, dentro del Área Metropolitana de Guadalajara el 36.2% señaló que migró para reunirse con la familia, el 12.7% por un cambio u oferta de trabajo y el 10.7% para buscar trabajo. Destaca que el 3.2% lo hizo por inseguridad delictiva o violencia y el 6.9% para estudiar. Estos datos se muestran en la Figura 2.4



*Figura 2.4 Porcentaje de población de 5 años y más migrante según causa de la migración en el AMG  
(Fuente: Análisis General del Área Metropolitana de Guadalajara, IIEG, 2020)*

## 2.2.14.2. Educación

En 2020 el 98.0% de la población del Área Metropolitana de Guadalajara de 15 años y más se encontraba alfabetizada, un 98.1% de los hombres y 97.8% de las mujeres. Entre 2010 y 2020, la tasa de alfabetización en el Área Metropolitana se incrementó en un 1.2%, un 1.0% para los hombres y un 1.4% entre las mujeres de 15 años y más. A lo largo de esa década, estas últimas pasaron de 96.5% a 97.8% de la población femenina adulta en esa condición. Esto se muestra en la Figura 2.5 y revela un paso para igualdad de género.



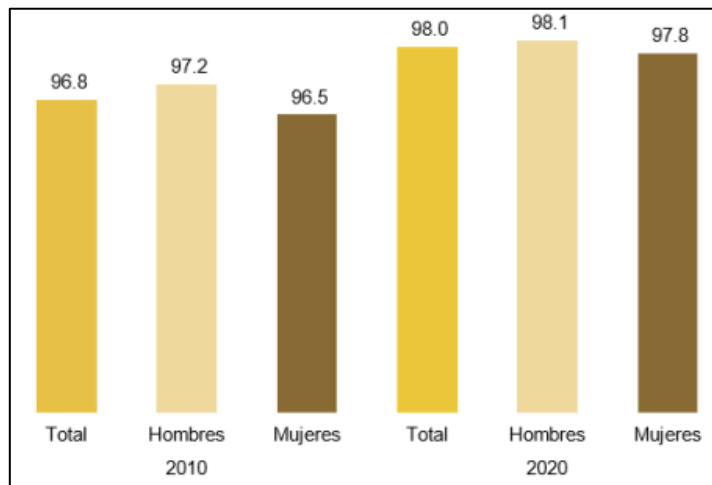


Figura 2.5 Tasas de alfabetización de la población de 15 años y más según sexo, en el AMG  
(Fuente: Análisis General del Área Metropolitana de Guadalajara, IIEG, 2020)

Por su parte, en el período 2010-2020, el promedio de escolaridad de la población de 15 años y más en el AMG se incrementó en todos los municipios. De acuerdo con los resultados del Censo 2020, Zapopan es el municipio con mayor grado promedio de escolaridad, con 11.5 años aprobados, esto es, el equivalente a dos años de bachillerato, un 10.5% más que el reportado en 2010, cuando era de 10.4 años. En el otro extremo, el municipio con menor grado promedio de escolaridad de esta Área Metropolitana es Zapotlanejo, con 7.9 años; quien registró un incremento del 18.4% en este indicador, respecto al reportado en 2010 que fue de 6.6 años. Lo anterior se muestra en la Figura 2.6.

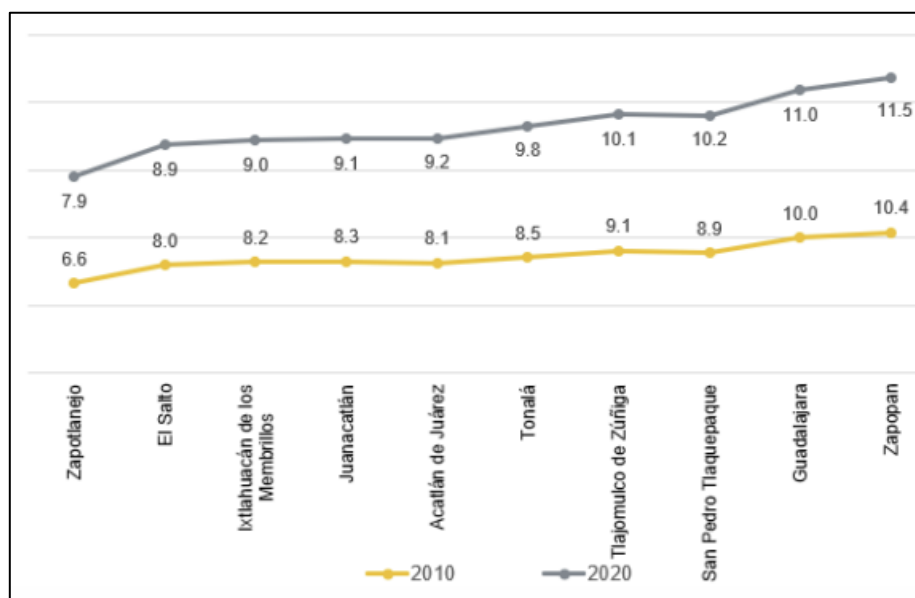


Figura 2.6 Grado promedio de escolaridad por municipio en el AMG  
(Fuente: Análisis General del Área Metropolitana de Guadalajara, IIEG, 2020)

### 2.2.14.3. Marginación

La construcción del índice para las entidades federativas, regiones y municipios considera cuatro dimensiones estructurales de la marginación: falta de acceso a la educación (población analfabeta de 15 años o más y población sin primaria completa de 15 años o más), residencia en viviendas inadecuadas (sin disponibilidad de agua entubada, sin drenaje ni servicio sanitario exclusivo, con piso de tierra, sin disponibilidad de energía eléctrica y con algún nivel de hacinamiento), percepción de ingresos monetarios insuficientes (ingresos hasta 2 salarios mínimos) y residir en localidades pequeñas con menos de 5 mil habitantes.

Dentro de las áreas urbanas existe una gran marginación. De acuerdo con el INEGI, en las áreas urbanas existen 13,356 zonas que tienen un alto y muy alto grado de marginación, lo que representa un 18% de las áreas urbanas en su totalidad. Con respecto a las localidades rurales, el INEGI establece que, de las 859 localidades, existen 268 que tienen el mismo grado de marginación y se ubican principalmente en la periferia de la mancha urbana. Lo anterior se puede apreciar en la lámina 2.25.

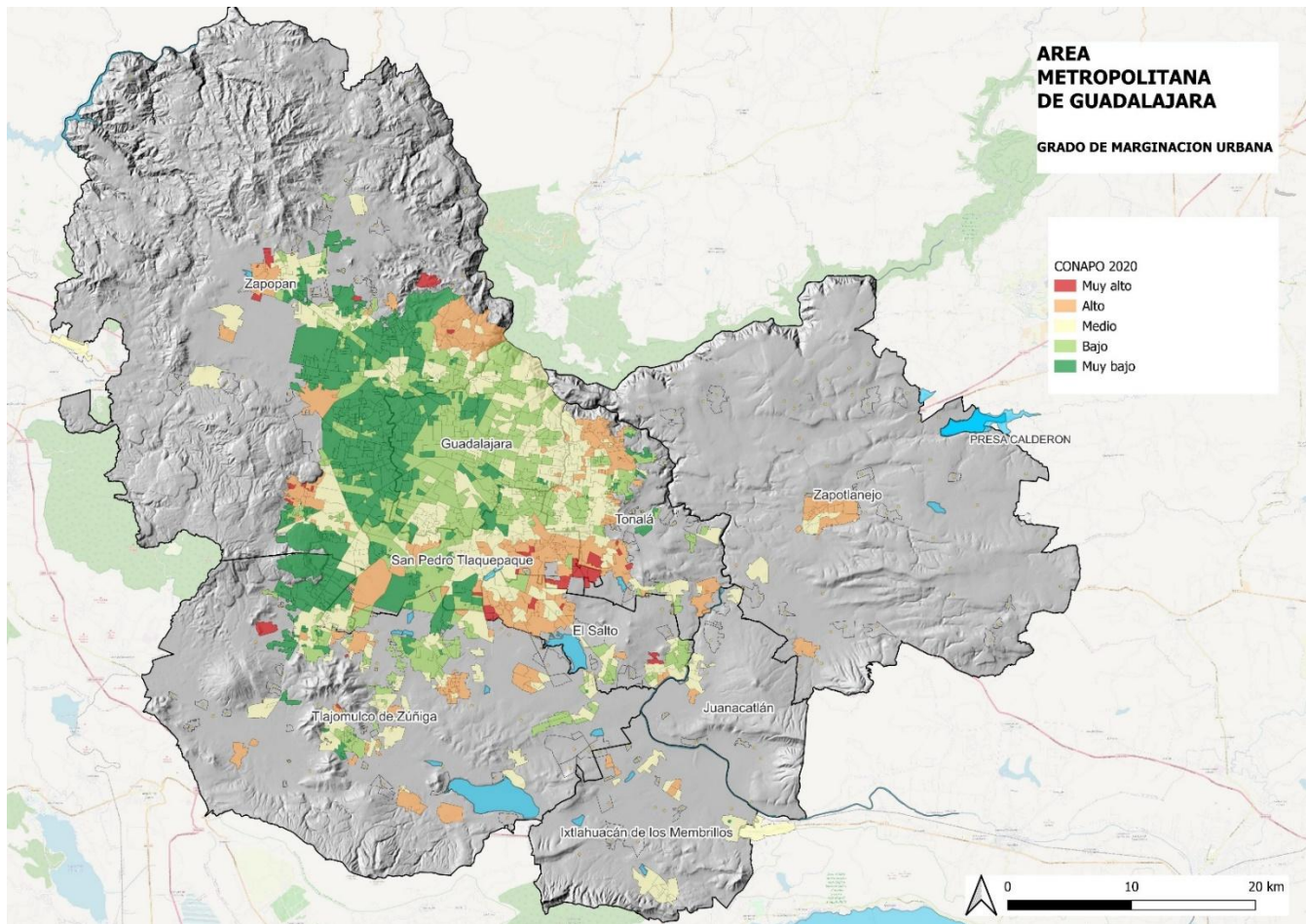


Lámina 2.25 Grado de marginación del AMG (Elaboración propia con datos de la plataforma SIGMetro, IMEPLAN)

#### 2.2.14.4. Índice de Suficiencia de Servicios Básicos

La capa denominada Índice de Suficiencia de Servicios Básicos forma parte de los indicadores metropolitanos que IMEPLAN utiliza para evaluar condiciones de habitabilidad y planeación urbana en el Área Metropolitana de Guadalajara. La información refleja la cobertura de: agua potable, drenaje, electricidad y pavimentación. Su propósito es mostrar qué tan bien están distribuidos estos servicios en relación con la población y el suelo urbano, permitiendo identificar áreas con suficiencia o carencia. En la lámina 2.26 podemos observar geográficamente el comportamiento en el AMG.

En síntesis, esta capa es un indicador espacial de la suficiencia de servicios básicos en el AMG, útil para identificar desigualdades territoriales y orientar políticas de planeación permitiendo visualizar contrastes entre zonas consolidadas y áreas con rezago.



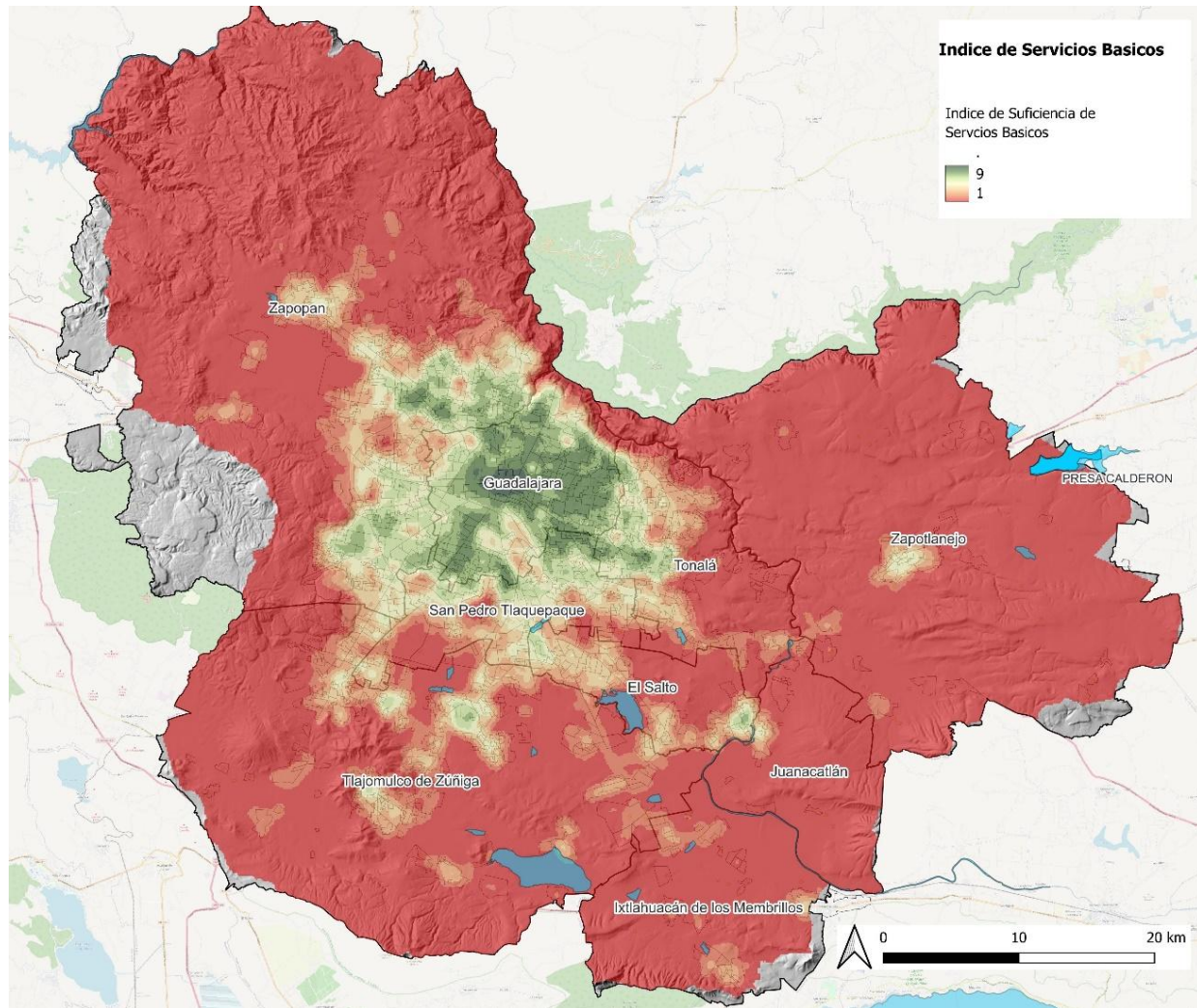


Lámina 2.26 Índice de servicios básicos (c Elaboración propia con datos de la plataforma SIGMetro, IMEPLAN)

Los valores altos son zonas con buena cobertura y acceso a servicios básicos; valores bajos son zonas con déficit, carencias o insuficiencia de servicios. La distribución espacial del índice en el AMG muestra contrastes significativos: las áreas con mayor suficiencia se concentran en superficies reducidas, mientras que las zonas con menor cobertura abarcan extensiones mucho más amplias. Según los datos, únicamente 6 km<sup>2</sup> alcanzan un valor de 9, mientras que 57 km<sup>2</sup> se ubican en el nivel 8 y 71 km<sup>2</sup>

en el nivel 7. Conforme disminuye la suficiencia, la superficie aumenta: 89 km<sup>2</sup> en nivel 6, 99 km<sup>2</sup> en nivel 5, 126 km<sup>2</sup> en nivel 4 y 143 km<sup>2</sup> en nivel 3. Las áreas con valores más bajos son las más extensas: 236 km<sup>2</sup> en nivel 2 y 2,378 km<sup>2</sup> en nivel 1.

#### 2.2.14.5. Vivienda

Respecto a la disponibilidad de bienes y tecnologías de la información y de la comunicación en las viviendas del Área Metropolitana de Guadalajara, conforme a los resultados del Censo 2020, el 94.4% de las viviendas particulares habitadas disponían de televisión, 94.4% de refrigerador, 93.7% de teléfono celular, 66.6% contaban con internet, 55.3% con automóvil o camioneta y el 48.6% tenían computadora.

Entre 2010 y 2020 la proporción de viviendas con acceso a internet se incrementó en un 104.2%, el porcentaje de las que tenían computadora creció 15.8% y los de teléfono celular un 15.3%. Esta información se muestra en la Figura 2.7

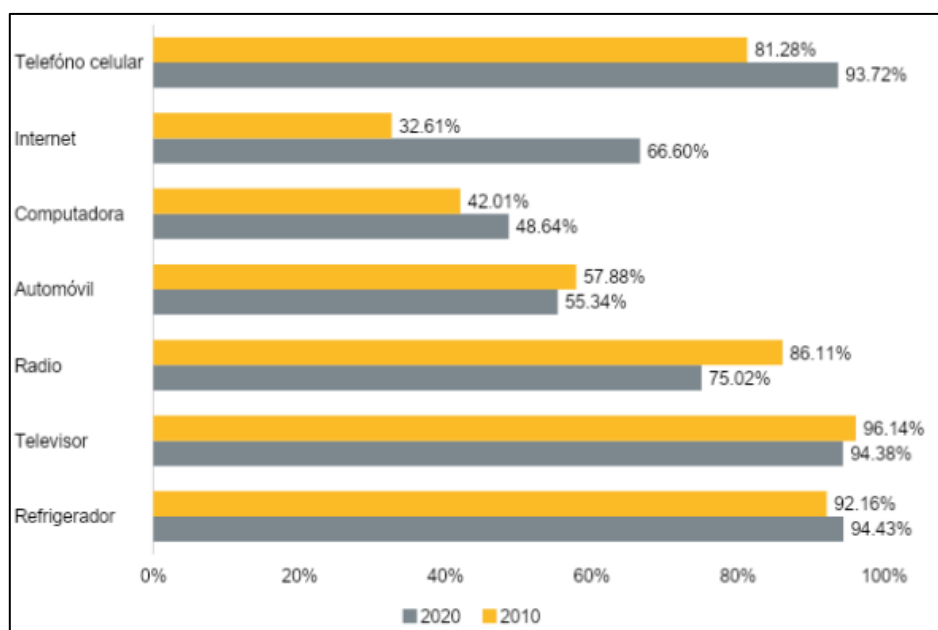


Figura 2.7 Porcentaje de viviendas particulares habitadas según disponibilidad de bienes y tecnologías de la información y de la comunicación (Fuente: Análisis General del Área Metropolitana de Guadalajara, IIEG, 2020)

#### 2.2.14.5. Producción Bruta Total

De acuerdo con información de Censos Económicos de INEGI, en el Área Metropolitana de Guadalajara, Guadalajara se

ha mantenido como el municipio con la mayor producción bruta total, sin embargo, su participación porcentual respecto al total del área metropolitana ha disminuido de manera continua, cayendo de 45.7% en 2003 a 36.1% en 2018. Zapopan se mantiene como el segundo municipio con valor contribución a la producción bruta total, pasando de 25.3% en 2003 a 27.1% en 2018.

Por otra parte, los municipios que han ganado una mayor participación han sido San Pedro Tlaquepaque, que aumentó de 5.9% en 2003 a 11.0% en 2018, un incremento de 5.1 puntos porcentuales y Tlajomulco de Zúñiga, que aumentó de 6.8% en 2003 a 10.0% en 2018, un incremento de 3.2 puntos. Lo anterior se muestra en la Figura 2.8

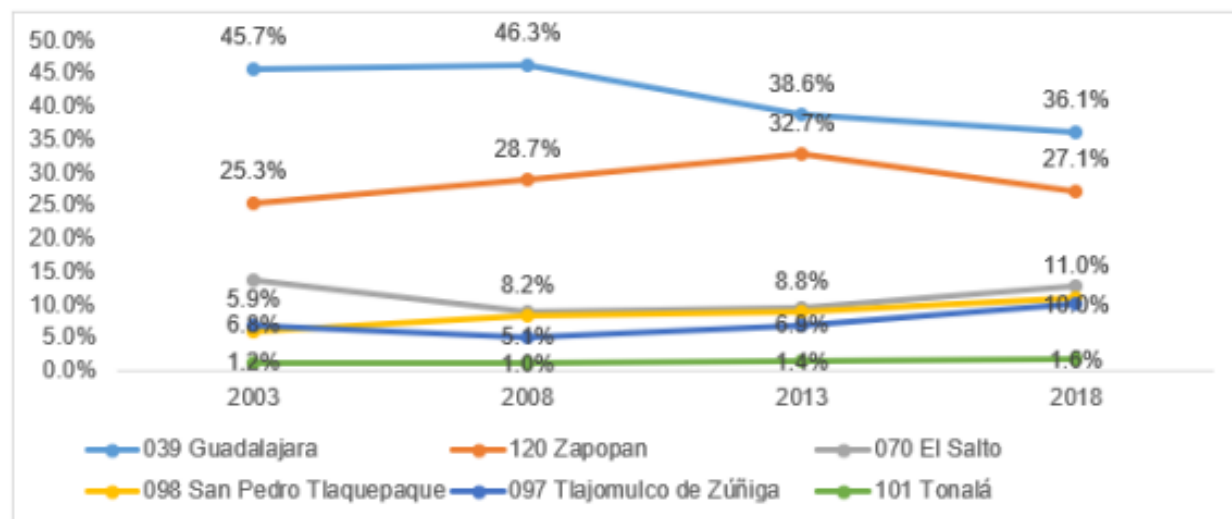


Figura 2.8 Distribución porcentual de la Producción Bruta Total de los municipios centrales del Área Metropolitana de Guadalajara por municipio, 2003-2018 (Fuente: Análisis General del Área Metropolitana de Guadalajara, IIEG, 2020)

A pesos corrientes, el municipio de Guadalajara tuvo el mayor incremento en la PRODUCCIÓN BRUTA TOTAL en términos absolutos de 186,071 millones de pesos en 5 años de 2013 a 2018, Zapopan el segundo con 118,247 mdp, y El Salto el tercero con 90,224 mdp. En total, el Área Metropolitana de Guadalajara creció 97.1% en términos nominales en 5 años, con 555,674 millones de pesos. Ver Figura 2.9.



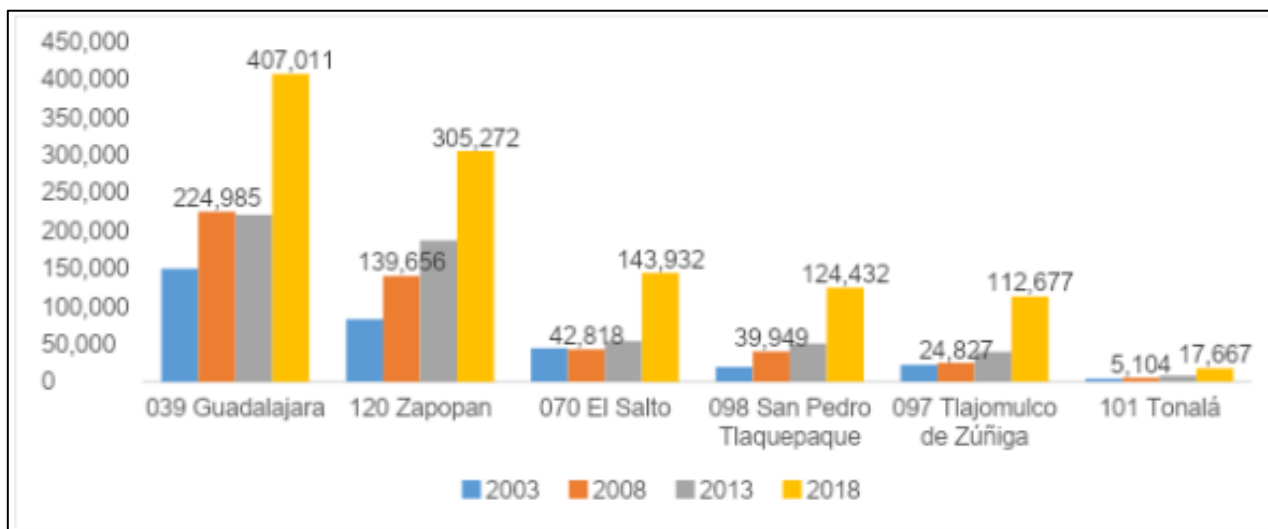


Figura 2.9 Producción Bruta Total de los municipios centrales del Área Metropolitana de Guadalajara por municipio, millones de pesos corrientes, 2003-2018 (Fuente: Análisis General del Área Metropolitana de Guadalajara, IIEG, 2020)

Zapotlanejo, Ixtlahuacán de los Membrillos, Acatlán de Juárez y Juanacatlán concentran apenas el 1.5% de la PRODUCCIÓN BRUTA TOTAL del Área Metropolitana de Guadalajara. Dentro de los municipios exteriores, Ixtlahuacán de los Membrillos se ha mantenido como el municipio con la mayor producción bruta total, con un 0.6% de participación en 2018. Sin embargo, Zapotlanejo ha aumentado su participación de 0.2% en 2003 a 0.6% en 2018. Lo anterior se muestra en la Figura 2.10.

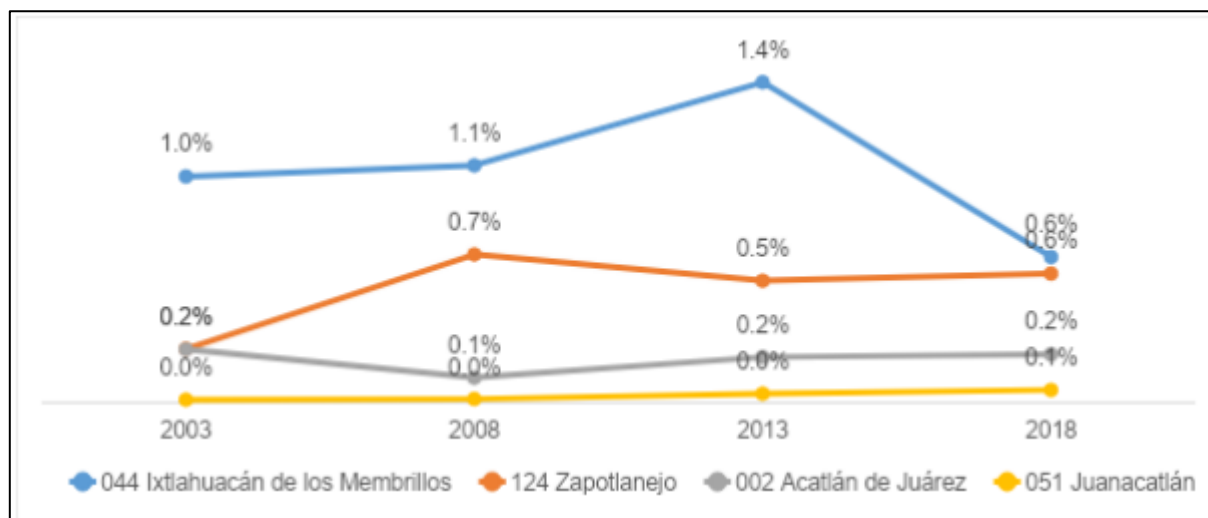


Figura 2.10 Distribución porcentual de la Producción Bruta Total de los municipios exteriores del Área Metropolitana de Guadalajara por municipio, 2003-2018 (Fuente: Análisis General del Área Metropolitana de Guadalajara, IIEG, 2020)

En la Tabla 2.20 se puede observar en conjunto las variaciones de la Producción Bruta Total por Municipio tanto en millones de pesos como en porcentajes siendo Tlajomulco de Zúñiga el de mayor crecimiento.

*Tabla 2.20 Variaciones de la Producción Bruta Total del Área Metropolitana de Guadalajara por municipio, 2008-2018  
(Análisis General del Área Metropolitana de Guadalajara, IIEG, 2020)*

| Municipio                            | Variación absoluta,<br>millones de pesos |               |                | Variación porcentual |              |              |
|--------------------------------------|------------------------------------------|---------------|----------------|----------------------|--------------|--------------|
|                                      | 2008                                     | 2013          | 2018           | 2008                 | 2013         | 2018         |
| <b>Guadalajara</b>                   | 75,482                                   | -4,046        | 186,071        | 50.5%                | -1.8%        | 84.2%        |
| <b>Zapopan</b>                       | 56,935                                   | 47,369        | 118,247        | 68.8%                | 33.9%        | 63.2%        |
| <b>El Salto</b>                      | -1,516                                   | 10,890        | 90,224         | -3.4%                | 25.4%        | 168.0%       |
| <b>San Pedro Tlaquepaque</b>         | 20,514                                   | 10,425        | 74,058         | 105.6%               | 26.1%        | 147.0%       |
| <b>Tlajomulco de Zúñiga</b>          | 2,508                                    | 14,680        | 73,171         | 11.2%                | 59.1%        | 185.2%       |
| <b>Tonalá</b>                        | 1,208                                    | 2,847         | 9,716          | 31.0%                | 55.8%        | 122.2%       |
| <b>Ixtlahuacán de los Membrillos</b> | 1,835                                    | 3,013         | -845           | 55.9%                | 58.9%        | -10.4%       |
| <b>Zapotlanejo</b>                   | 2,417                                    | -103          | 3,363          | 310.1%               | -3.2%        | 108.7%       |
| <b>Acatlán de Juárez</b>             | -234                                     | 616           | 1,264          | -30.3%               | 114.4%       | 109.5%       |
| <b>Juanacatlán</b>                   | 36                                       | 149           | 405            | 85.7%                | 189.3%       | 178.2%       |
| <b>Total</b>                         | <b>159,184</b>                           | <b>85,840</b> | <b>555,674</b> | <b>48.7%</b>         | <b>17.7%</b> | <b>97.1%</b> |

Las industrias manufactureras son las que tienen mayor participación en la producción bruta total en todos los municipios del área metropolitana, de acuerdo con los Censos Económicos 2019. Para Guadalajara representan el 38%, para El Salto el 92%, para Tlajomulco el 79%, para Tlaquepaque el 55%, para Tonalá el 42%, para Zapopan el 45%, para Acatlán de Juárez el 84%, para Ixtlahuacán de los Membrillos el 93.5%, para Juanacatlán 78.4%, y para Zapotlanejo 53.5%. En la Tabla 2.21 se pueden observar los valores en millones de pesos tanto por sectores como por los Municipios Centrales.

Tabla 2.21 Producción Bruta Total por sector de actividad económica en los municipios centrales del Área Metropolitana de Guadalajara, 2018 (Fuente: Análisis General del Área Metropolitana de Guadalajara, IIEG, 2020)

| Sector de actividad económica                                                                                                            | Millones de pesos |                |                      |                       |               |                |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|----------------|----------------------|-----------------------|---------------|----------------|
|                                                                                                                                          | Guadalajara       | El Salto       | Tlajomulco de Zúñiga | San Pedro Tlaquepaque | Tonalá        | Zapopan        |
| Sector 11 Agricultura, cría y explotación de animales, aprovechamiento forestal, pesca y caza                                            | 12                | -              | 13                   | -                     | 3             | 14             |
| Sector 21 Minería                                                                                                                        | -                 | -              | -                    | -                     | -             | 36             |
| Sector 22 Gen., trans., distribución y comercialización de energía eléctric. suministro agua, gas natural por ductos al consumidor final | -                 | -              | -                    | -                     | -             | -              |
| Sector 23 Construcción                                                                                                                   | 27,117            | 210            | 320                  | 1,445                 | 114           | 10,963         |
| Sector 31-33 Industrias manufactureras                                                                                                   | 154,044           | 132,214        | 89,248               | 68,942                | 7,344         | 137,565        |
| Sector 43 Comercio al por mayor                                                                                                          | 43,929            | 6,675          | 3,902                | 25,970                | 926           | 22,715         |
| Sector 46 Comercio al por menor                                                                                                          | 40,984            | 1,499          | 7,991                | 8,183                 | 4,319         | 33,400         |
| Sector 48-49 Transportes, correos y almacenamiento                                                                                       | 19,018            | 1,483          | 2,746                | 6,345                 | 1,173         | 3,424          |
| Sector 51 Información en medios masivos                                                                                                  | 25,480            | 45             | 299                  | 257                   | 222           | 1,999          |
| Sector 52 Servicios financieros y de seguros                                                                                             | 7,388             | 31             | 334                  | 628                   | 265           | 2,834          |
| Sector 53 Servicios inmobiliarios y de alquiler de bienes muebles e intangibles                                                          | 6,763             | 131            | 577                  | 1,109                 | 86            | 4,543          |
| Sector 54 Servicios profesionales, científicos y técnicos                                                                                | 12,808            | 47             | 306                  | 925                   | 71            | 6,022          |
| Sector 55 Corporativos                                                                                                                   | 2,217             | -              | -                    | -                     | -             | -              |
| Sector 56 Servicios de apoyo a los negocios y manejo de residuos, y servicios de remediación                                             | 25,900            | 643            | 2,262                | 3,623                 | 882           | 9,441          |
| Sector 61 Servicios educativos                                                                                                           | 4,637             | 37             | 733                  | 2,126                 | 253           | 6,005          |
| Sector 62 Servicios de salud y de asistencia social                                                                                      | 8,029             | 38             | 614                  | 269                   | 222           | 4,832          |
| Sector 71 Servicios de esparcimiento culturales y deportivos, y otros servicios recreativos                                              | 2,080             | 12             | 288                  | 139                   | 128           | 4,913          |
| Sector 72 Servicios de alojamiento temporal y de preparación de alimentos y bebidas                                                      | 15,050            | 497            | 2,091                | 2,207                 | 951           | 10,834         |
| Sector 81 Otros servicios excepto actividades gubernamentales                                                                            | 8,044             | 345            | 807                  | 1,545                 | 707           | 5,726          |
| <b>Total municipal</b>                                                                                                                   | <b>407,011</b>    | <b>143,932</b> | <b>112,677</b>       | <b>124,432</b>        | <b>17,667</b> | <b>305,272</b> |

Cabe señalar que los Censos Económicos son levantamientos urbanos y semiurbanos, por lo que las actividades primarias que corresponden a agricultura, cría y explotación de animales, aprovechamiento forestal, pesca y caza están subrepresentadas en esta fuente del INEGI.



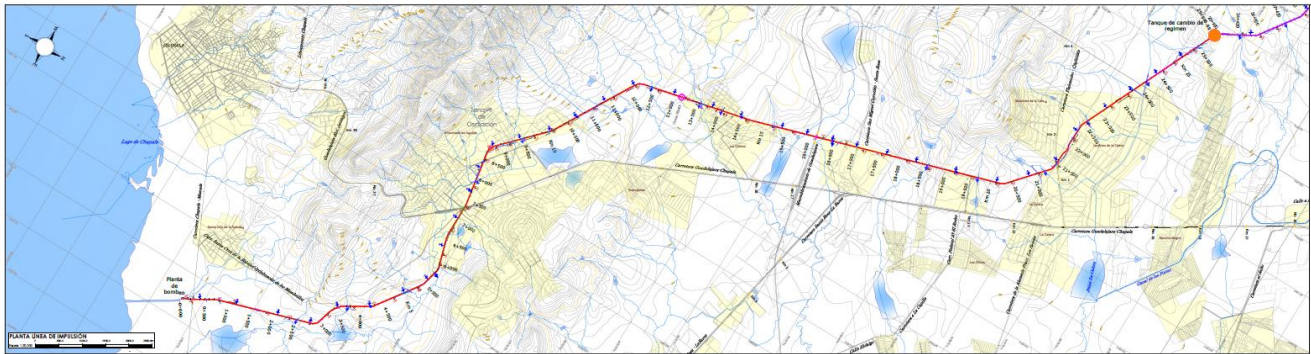
### 3. Propuesta de solución

El Acueducto Chapala Guadalajara se ubica dentro del derecho de vía en el cual se había previsto un segundo acueducto. Es por lo anterior, que el Acueducto Sustituto tendrá el mismo trazo del actual Acueducto.

En este estudio, se pretenden realizar las siguientes acciones.

- 1. Línea de Conducción de la Estación de Bombeo Chapala a Tanque de Cambio de Régimen.
- 2. Tanque de Oscilación.
- 3. Estructura de Cambio de Régimen.
- 4. Línea de Conducción por Gravedad del Tanque de Cambio de Régimen al Tanque de Entrega Cerro del 4.
- 5. Tanque de Entrega.

*Lámina 3.1 Línea de Conducción Estación de Bombeo a Tanque de Cambio de Régimen*



*Lámina 3.2 Tanque de Oscilación*

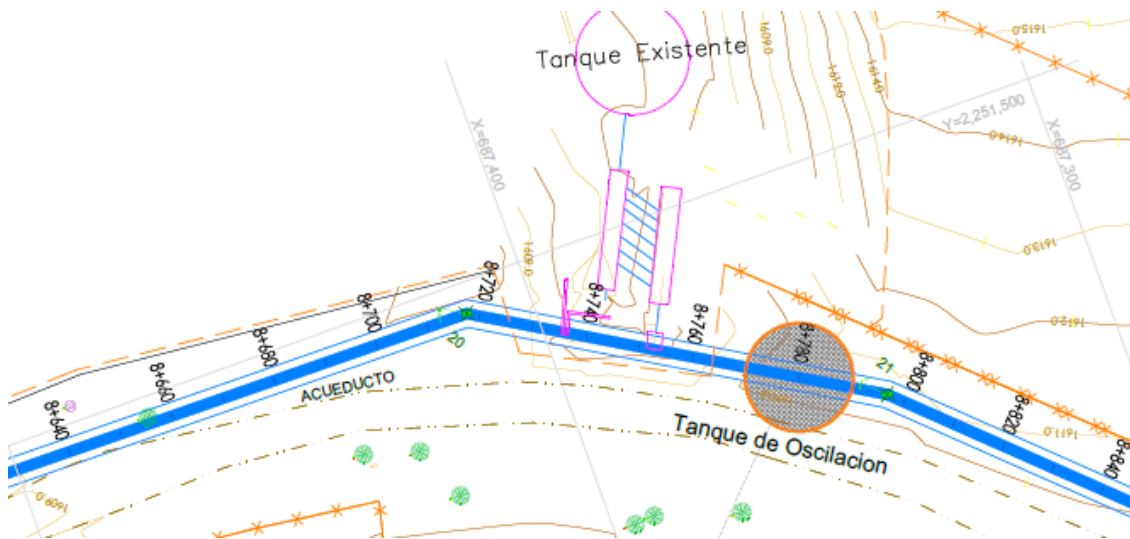


Lámina 3.3 Tanque de Cambio de Régimen

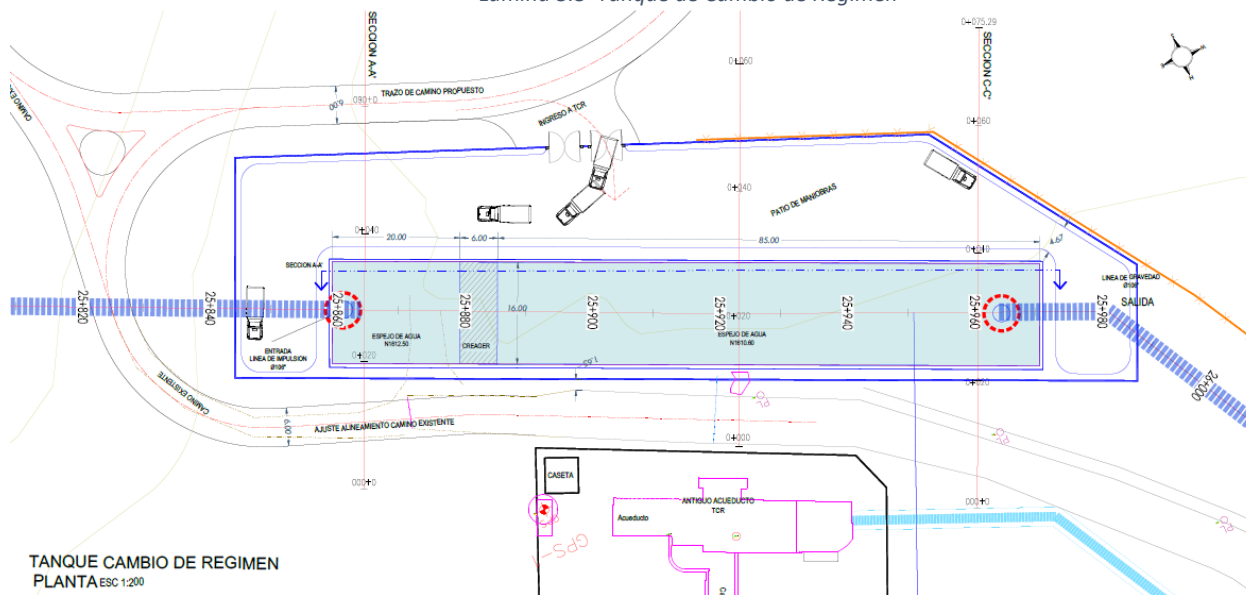




Lámina 3.4 Línea de Conducción de Tanque de Cambio de Régimen a Tanque de Entrega

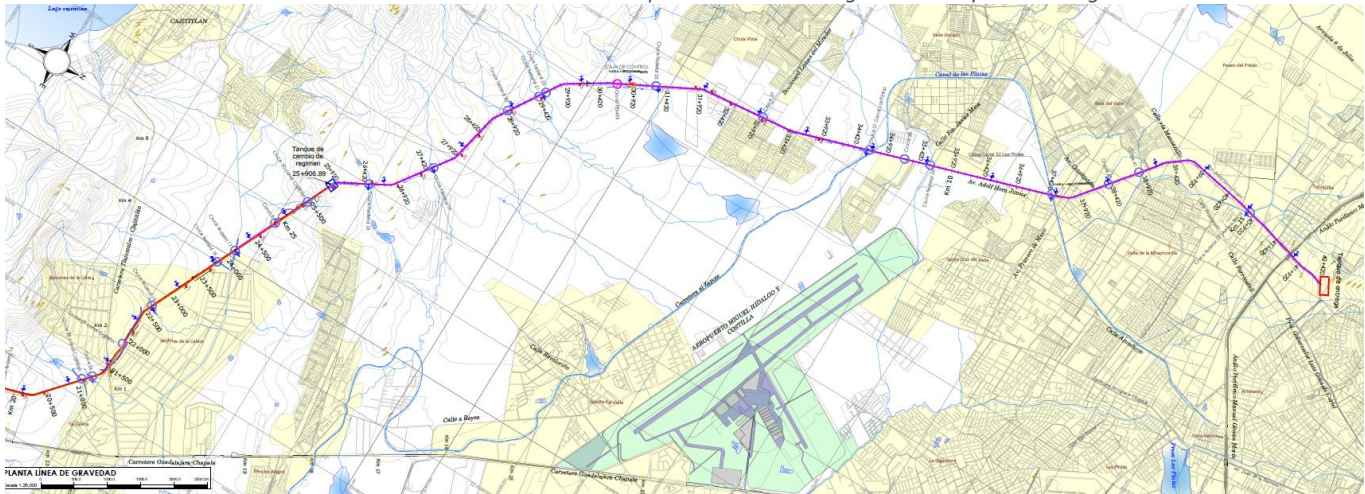


Lámina 3.5 Tanque de Entrega

## 4. Estudios básicos

### 4.1. Datos básicos

En los últimos 30 años la población del AMG creció en 2.2 millones de habitantes, esto resultante de la conurbación de 9 municipios. En 2020 contaba con una población de 5,243,392 habitantes según los datos del censo 2020 publicados por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). Ver Tabla 4.1

Tabla 4.1 Población Censo 2020 INEGI

| Área metropolitana de Guadalajara | POBLACION CENSO INEGI |                  |                  |                  |                  |
|-----------------------------------|-----------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
|                                   | 1990                  | 2000             | 2010             | 2015             | 2020             |
| El Salto                          | 38,281                | 83,453           | 138,226          | 183,437          | 232,852          |
| Guadalajara                       | 1,650,205             | 1,646,319        | 1,495,189        | 1,460,148        | 1,385,629        |
| Ixtlahuacán de los Membrillos     | 16,674                | 21,605           | 41,060           | 53,045           | 67,969           |
| Juanacatlán                       | 10,068                | 11,792           | 13,218           | 17,955           | 30,855           |
| San Pedro Tlaquepaque             | 339,649               | 474,178          | 608,114          | 664,193          | 687,127          |
| Tlajomulco de Zúñiga              | 68,428                | 123,619          | 416,626          | 549,442          | 727,750          |
| Tonalá                            | 168,555               | 337,149          | 478,689          | 536,111          | 569,913          |
| Zapopan                           | 712,008               | 1,001,021        | 1,243,756        | 1,332,272        | 1,476,491        |
| Zapotlanejo                       | 39,902                | 53,461           | 63,636           | 68,519           | 64,806           |
| <b>Total</b>                      | <b>3,043,770</b>      | <b>3,752,597</b> | <b>4,498,514</b> | <b>4,865,122</b> | <b>5,243,392</b> |

El período de diseño del Acueducto Sustituto Chapala Guadalajara será de 30 años por lo cual se calculó en base a la población histórica presentada en la Tabla 2.21 como las proyecciones de CONAPO para el Área Metropolitana de Guadalajara la población esperada para el 2055 las cuales se consignan en la Tabla 4.2 la cual se estima en 7'004,728 habitantes.

Tabla 4.2 Proyección de Población del AMG (Fuente: Elaboración Propia)

| Área metropolitana de Guadalajara | PROYECCIÓN CONAPO |           |           | PROYECCIÓN CALCULADA |           |           |
|-----------------------------------|-------------------|-----------|-----------|----------------------|-----------|-----------|
|                                   | 2030              | 2035      | 2040      | 2045                 | 2050      | 2055      |
| El Salto                          | 354,920           | 416,805   | 475,964   | 546,724              | 617,304   | 690,777   |
| Guadalajara                       | 1,362,948         | 1,336,778 | 1,316,107 | 1,289,052            | 1,262,551 | 1,236,595 |
| Ixtlahuacán de los Membrillos     | 95,742            | 108,554   | 120,263   | 133,044              | 145,771   | 158,603   |
| Juanacatlán                       | 41,162            | 44,820    | 47,224    | 53,202               | 59,221    | 65,282    |
| San Pedro Tlaquepaque             | 759,272           | 776,262   | 783,276   | 800,675              | 816,737   | 831,650   |
| Tlajomulco de Zúñiga              | 914,861           | 1,004,364 | 1,105,538 | 1,162,081            | 1,200,472 | 1,220,657 |
| Tonalá                            | 632,978           | 646,966   | 650,859   | 668,159              | 684,226   | 699,224   |
| Zapopan                           | 1,689,444         | 1,778,917 | 1,876,674 | 1,940,508            | 1,997,438 | 2,048,810 |



|              |                  |                  |                  |                  |                  |                  |
|--------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| Zapotlanejo  | 64,287           | 62,439           | 59,972           | 57,602           | 55,321           | 53,131           |
| <b>Total</b> | <b>5,915,614</b> | <b>6,175,905</b> | <b>6,435,877</b> | <b>6,651,048</b> | <b>6,839,042</b> | <b>7,004,728</b> |

Considerando para fines de planeación una dotación promedio para el AMG de 210 litros por habitante por día en 2020 la demanda del Área Metropolitana de Guadalajara era de 12.74 metros cúbicos por segundo. De acuerdo con las proyecciones de población calculadas para el 2050 se tendría una demanda de 17.03 metros cúbicos por segundo para todos los Municipios. Lo anterior se aprecia en la Tabla 4.3

*Tabla 4.3 Demanda de agua potable del AMG*

| <b>Municipio - Período</b>                 | <b>2020</b>  | <b>2025</b>  | <b>2030</b>  | <b>2035</b>  | <b>2040</b>  | <b>2045</b>  | <b>2050</b>  | <b>2055</b>  |
|--------------------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| El Salto                                   | 566          | 716          | 863          | 1013         | 1157         | 1329         | 1500         | 1679         |
| Guadalajara                                | 3368         | 3364         | 3313         | 3249         | 3199         | 3133         | 3069         | 3006         |
| Ixtlahuacán de los Membrillos              | 165          | 201          | 233          | 264          | 292          | 323          | 354          | 385          |
| Juanacatlán                                | 75           | 90           | 100          | 109          | 115          | 129          | 144          | 159          |
| San Pedro Tlaquepaque                      | 1670         | 1780         | 1845         | 1887         | 1904         | 1946         | 1985         | 2021         |
| Tlajomulco de Zúñiga                       | 1769         | 2017         | 2224         | 2441         | 2687         | 2825         | 2918         | 2967         |
| Tonalá                                     | 1385         | 1483         | 1538         | 1572         | 1582         | 1624         | 1663         | 1700         |
| Zapopan                                    | 3589         | 3884         | 4106         | 4324         | 4561         | 4717         | 4855         | 4980         |
| Zapotlanejo                                | 158          | 159          | 156          | 152          | 146          | 140          | 134          | 129          |
| <b>Total en litros por segundo</b>         | <b>12744</b> | <b>13693</b> | <b>14378</b> | <b>15011</b> | <b>15643</b> | <b>16166</b> | <b>16623</b> | <b>17025</b> |
| <b>Total en metros cúbicos por segundo</b> | <b>12.74</b> | <b>13.69</b> | <b>14.38</b> | <b>15.01</b> | <b>15.64</b> | <b>16.17</b> | <b>16.62</b> | <b>17.03</b> |

Cabe mencionar que la concesión para el Sistema Chapala cuenta con un volumen de 7.5 metros cúbicos por segundo y esto representa el 54.78% de la demanda total de los 9 Municipios.

La demanda en base al crecimiento poblacional en la zona abastecida actualmente por Siapa y de acuerdo con las diferentes fuentes de abastecimiento se muestra en la Tabla 4.4. Esto se calculó proporcionalmente a las proyecciones de población utilizada para la Zona Metropolitana.

*Tabla 4.4 Demanda Futura de Agua Potable en las Zonas Abastecidas Actualmente por Siapa*

| <b>FUENTE DE ABASTECIMIENTO</b> | <b>2020</b>  | <b>2025</b>  | <b>2035</b>  | <b>2045</b>  | <b>2055</b>  |
|---------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| SISTEMA CHAPALA                 | 7.50         | 7.50         | 7.50         | 7.50         | 7.50         |
| SISTEMA CALDERON                | 2.16         | 2.33         | 2.20         | 2.25         | 2.30         |
| POZOS Y MANANTIALES             | 1.40         | 1.60         | 2.00         | 2.40         | 2.50         |
| <b>SUMAS</b>                    | <b>10.20</b> | <b>11.10</b> | <b>12.00</b> | <b>12.90</b> | <b>13.50</b> |

Con el propósito de aprovechar de manera óptima el volumen concesionado del Lago de Chapala, y con base en el análisis histórico de los niveles del lago (1990 a la fecha), así como en los resultados de los estudios hidráulicos realizados para la determinación del diámetro económico bajo distintos escenarios de operación, se definió que el acueducto será diseñado para una capacidad máxima de conducción de 10.0 m<sup>3</sup>/s.

Este dimensionamiento corresponde al gasto máximo instantáneo de operación, el cual se operará bajo un esquema controlado de 18 horas diarias de bombeo, de tal manera que el volumen anual conducido se mantenga dentro de los límites establecidos en el título de concesión vigente (236 hm<sup>3</sup>/año, equivalente a un gasto promedio de 7.5 m<sup>3</sup>/s), sin exceder la disponibilidad autorizada por la Comisión Nacional del Agua.

En base a lo anterior en la Tabla 4.5 se muestran el resumen de los resultados obtenidos en el diseño hidráulico.

*Tabla 4.5 Datos de proyecto*

| Datos de proyecto Acueducto Sustituto Chapala Guadalajara          |                 |          |
|--------------------------------------------------------------------|-----------------|----------|
| Datos Generales                                                    |                 |          |
| Gasto de diseño del acueducto sustituto Chapala Guadalajara        | 10.00           | m³/s     |
| Días en operación por año                                          | 365             |          |
| Horas de bombeo por día                                            | 18              | horas    |
| Volumen anual extraído de Lago de Chapala                          | 236.00          | hm³      |
| Volumen disponible de Lago de Chapala                              | 236.00          | hm³      |
| Tipo de acueducto                                                  | Bombeo-Gravedad |          |
| Línea de impulsión                                                 |                 |          |
| Material principal de la tubería                                   | Acero ASTM A 53 |          |
| Rugosidad absoluta del material                                    | 0.10            | mm       |
| Diámetro de la tubería                                             | 106             | pulgadas |
| Longitud de la conducción                                          | 25,920          | metros   |
| Desnivel topográfico                                               | 96.50           | metros   |
| Altura efectiva del tanque de cambio de régimen (flujo permanente) | 6.50            | metros   |
| Namino Lago de Chapala                                             | 1522.00         | msnm     |
| Namo Lago de Chapala                                               | 1516.00         | msnm     |
| Nivel SLA del TCR                                                  | 1612.50         | msnm     |
| Pérdidas por fricción                                              | 23.14           | metros   |
| Pérdidas locales                                                   | 1.16            | metros   |
| Pérdidas totales                                                   | 24.30           | metros   |
| Carga dinámica total                                               | 120.80          | metros   |
| Línea a gravedad                                                   |                 |          |
| Material principal de la tubería                                   | Acero ASTM A 53 |          |
| Rugosidad absoluta del material                                    | 0.10            | mm       |
| Diámetro de la tubería                                             | 106             | pulgadas |
| Longitud de la conducción                                          | 16,460          | metros   |
| Desnivel topográfico                                               | 25.14           | metros   |
| Nivel SLA del TCR                                                  | 1610.60         | msnm     |

|                                 |         |        |
|---------------------------------|---------|--------|
| Nivel SLA del Tanque de Entrega | 1585.46 | msnm   |
| Pérdidas por fricción           | 22.08   | metros |
| Pérdidas locales                | 1.10    | metros |
| Pérdidas totales                | 23.19   | metros |

## 4.2. Estudios Topográficos

La topografía es una ciencia que estudia el conjunto de procedimientos para determinar las posiciones relativas de puntos sobre la superficie de la tierra, así como debajo de la misma, mediante la combinación de las medidas según los tres elementos del espacio: distancia, elevación y dirección. La topografía explica los procedimientos y operaciones del trabajo de campo, los métodos de cálculo o procesamiento de datos y la representación del terreno en un plano o dibujo topográfico a escala. El conjunto de operaciones necesarias para determinar las posiciones de puntos en la superficie de la tierra, tanto en planta como en altura, los cálculos correspondientes y la representación en un plano (trabajo de campo más trabajo de gabinete) es lo que comúnmente se llama "Levantamiento Topográfico". La topografía como ciencia que se encarga de las mediciones de la superficie de la tierra se divide en tres ramas principales que son la geodesia, la fotogrametría y la topografía plana.

El levantamiento que se requiere para el presente estudio tiene por objeto marcar o localizar linderos, medianías o límites de propiedades, medir y dividir superficies, ubicar terrenos en planos generales ligando con levantamientos anteriores o proyectar obras y construcciones. Las principales operaciones son:

- Levantamiento topográfico de la franja donde va a quedar emplazada la obra tanto en planta como en elevación (planimetría y altimetría simultáneas).
- Definición de itinerario y medición de poligonales por los linderos existentes para hallar su longitud y orientación o dirección.
- División de fincas en parcelas de forma y características determinadas, operación que se conoce con el nombre de particiones.
- Referencia de mojoneras, ligados posicionalmente a señales permanentes en el terreno.
- Diseño en planta del eje de la vía según las especificaciones de diseño geométrico dadas para el tipo de obra.
- Trazo y localización de las obras respecto al eje, tales como puentes, desagües, alcantarillas, drenajes, filtros, muros de contención, etc.
- Localización y señalamiento de los derechos de vía o zonas legales de paso a lo largo del eje de la obra.
- Nivelación del eje estacado mediante itinerarios de nivelación para determinar el perfil del terreno a lo largo del eje diseñado y localizado.
- Representación gráfica del levantamiento mediante la confección o dibujo de planos.
- Cálculo de volúmenes (cubicación) y programación de los movimientos de tierras (diagramas de masas) para la optimización de cortes y rellenos hasta alcanzar la línea de subrasante de la vía.

La incorporación de microprocesadores y distanciómetros electrónicos en todos los teodolitos electrónicos ha dado paso a la construcción de las Estaciones Totales.

Con una estación total electrónica se pueden medir las distancias verticales y horizontales, ángulos verticales y horizontales, e internamente, con el microprocesador programado, calcular las coordenadas topográficas (norte[y], este[x], elevación[z]) de los puntos visados. Estos instrumentos poseen también tarjetas magnéticas para almacenar datos, los cuales pueden ser cargados en una computadora y utilizados con el programa de aplicación seleccionado.

Una de las características importantes tanto de los teodolitos electrónicos como de las estaciones totales, es que pueden medir ángulos horizontales en ambos sentidos y ángulos verticales con el cero en el horizonte o en el zenit.

El levantamiento topográfico se realizó empleando un equipo RTK GNSS SOUTH y una estación total marca TRIMBLE modelo 5600 con precisión angular de 2". Los equipos se pueden apreciar en la Figura 4.1



Figura 4.1 Equipo topográfico RTK GNSS SOUTH y Estación total marca TRIMBLE 5600

El lugar donde se lleva a cabo este levantamiento se localiza en los Municipios de San Pedro Tlaquepaque, Tlajomulco de Zúñiga, Ixtlahuacán de los Membrillos y Chapala. El trabajo se llevó a cabo realizando las siguientes actividades:

**Reconocimiento del terreno.** El objetivo de este paso es el de delimitar la superficie de estudio, en este caso se realizó un vuelo con dron a lo largo de los 42 kilómetros del trazo. Posteriormente se editaron las imágenes y se realizó un video indicando los valores de los cadenamientos a cada kilómetro.





Lámina 4.1 Área de estudio Acueducto Sustituto Chapala Guadalajara

**Estudio Aerofotogramétrico.** El estudio aerofotogramétrico con dron es un método que permite obtener de forma confiable información adicional a la topografía para la realización de proyectos de ingeniería, esto es posible a los avances tecnológicos actuales. El objetivo del presente estudio, en primer lugar, es llevar a cabo la toma de fotografías aéreas, utilizando una cámara digital de 20Mpíxeles, montada sobre un dron, mismo que se opera con un sistema de piloto automatizado y que este nos permite tener un control en la dirección, altura, y obturación de la cámara. Posteriormente se realizan trabajos de apoyo terrestre con receptores de señal satelital conocidos como GPS, mediante la medición sobre puntos previamente marcados con el fin de ser fácilmente identificados en el proceso de Aerotriangulación analítica digital. En la aerotriangulación se obtienen los puntos de paso suficientes para lograr la orientación interna, relativa y absoluta, necesarias para la visión estereoscópica, en cuanto a la posición de todos los elementos registrados en la fotografía, y de igual forma la representación del nivel superficial de terreno natural. Y por último la restitución digital que nos permitirá compilar toda la información necesaria mediante la vectorización de la imagen y coleccionar puntos en 3D, generando un modelo digital de terreno, que nos permitirán presentar el proyecto por medio de una planimetría. Este estudio nos permitirá trabajar la etapa de anteproyecto para la elección del eje de trazo. El equipo utilizado es un Dron Mavic 3E así como un Receptor Trimble R4.



*Figura 4.2 Dron Mavic 3E*



*Figura 4.3 Equipo Receptor Trimble R4*

Con la información se obtiene una imagen (ortofoto) obtenida a partir de fotogramas con todos los detalles naturales o artificiales del terreno en su correcta posición en el plano y permite medidas de distancias y superficies con métricas reales. Esto se consigue mediante procesos que corrigen las fotos originales de los desplazamientos debidos a la inclinación de la cámara en el momento de la toma y del desplazamiento debido al relieve del terreno fotografiado.

Finalmente se lleva a cabo la integración de modelo digital de elevación obtenido en el proceso de restitución y mediante la rectificación de píxeles por cada fotografía se obtiene una imagen adherida al terreno natural, por lo que una vez terminado este proceso se procede a el congelamiento de la imagen y así obtener una imagen que permita observar su contenido en



dimensiones reales. Los resultados se integraron las láminas correspondientes a toda la longitud de trazo. En la lámina 4.2 se puede apreciar un ejemplo de las mismas.



Lámina 4.2 Planimetría, Altimetría y Ortofoto

**Colocación de Puntos GPS.** Utilizando la red geodésica nacional del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) se eligieron puntos estratégicos para la ubicación de puntos GPS aproximadamente a cada 2 km. En los puntos se instalaron placas con sus datos de identificación. En la figura 4.4 se muestra el primer punto denominado GPS-1 ubicado dentro de la Estación de Bombeo del actual Acueducto Chapala Guadalajara. En los lugares donde no se contaba con elementos para la fijación de las placas, se construyeron monumentos de concreto para la instalación de las mismas.



Figura 4.4 Placa de Identificación en Puntos GPS.

La ubicación de los puntos se plasmó en un plano con la información técnica de cada uno de ellos. En la lámina 4.3 se puede visualizar el resultado obtenido.

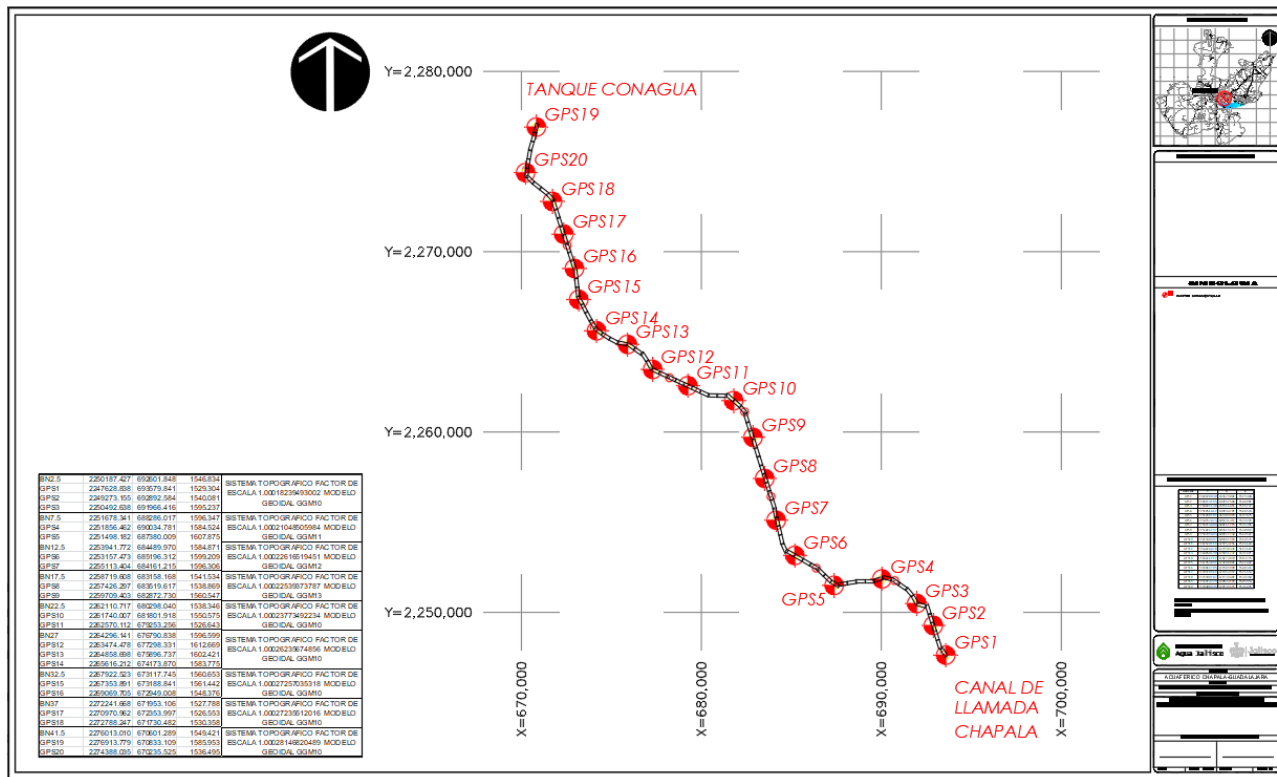


Lámina 4.3 Ubicación y Datos de Puntos GPS

**Bancos de nivel.** De la misma red geodésica nacional del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), se colocaron adicionalmente a lo largo del eje de trazo bancos de nivel a cada 500 mts. En la figura 5.5 se muestra uno de



los Bancos de Nivel del tramo de estudio.



*Figura 4.5 Fotografía de Banco de Nivel KM 5.5*

En la tabla 4.6 se muestran valores tanto de Puntos Gps y Bancos de Nivel con su respectivo factor de escala y el Modelo Geoidal utilizado para el cálculo de los mismos.

*Tabla 4.6 Bancos de nivel y Puntos GPS*

|        |             |            |          |                                                                                  |
|--------|-------------|------------|----------|----------------------------------------------------------------------------------|
| BN2.5  | 2250187.427 | 692601.848 | 1546.834 | SISTEMA TOPOGRAFICO FACTOR DE<br>ESCALA 1.00018239493002 MODELO<br>GEOIDAL GGM10 |
| GPS1   | 2247628.838 | 693579.841 | 1529.304 |                                                                                  |
| GPS2   | 2249273.155 | 692892.584 | 1540.081 |                                                                                  |
| GPS3   | 2250492.638 | 691966.416 | 1595.237 |                                                                                  |
| BN7.5  | 2251678.341 | 688286.017 | 1596.347 | SISTEMA TOPOGRAFICO FACTOR DE<br>ESCALA 1.00021048505984 MODELO<br>GEOIDAL GGM11 |
| GPS4   | 2251856.462 | 690034.781 | 1584.524 |                                                                                  |
| GPS5   | 2251498.182 | 687380.009 | 1607.875 |                                                                                  |
| BN12.5 | 2253941.772 | 684489.970 | 1584.871 |                                                                                  |
| GPS6   | 2253157.473 | 685196.312 | 1599.209 | SISTEMA TOPOGRAFICO FACTOR DE<br>ESCALA 1.00022616519451 MODELO<br>GEOIDAL GGM12 |
| GPS7   | 2255113.404 | 684161.215 | 1596.306 |                                                                                  |
| BN17.5 | 2258719.608 | 683158.168 | 1541.534 |                                                                                  |
| GPS8   | 2257426.297 | 683519.617 | 1538.869 |                                                                                  |
| GPS9   | 2259709.403 | 682872.730 | 1560.547 | SISTEMA TOPOGRAFICO FACTOR DE<br>ESCALA 1.00023773492234 MODELO<br>GEOIDAL GGM10 |
| BN22.5 | 2262110.717 | 680298.040 | 1538.346 |                                                                                  |
| GPS10  | 2261740.007 | 681801.918 | 1550.575 |                                                                                  |
| GPS11  | 2262570.112 | 679253.256 | 1526.643 |                                                                                  |
| BN27   | 2264296.141 | 676790.838 | 1596.599 | SISTEMA TOPOGRAFICO FACTOR DE<br>ESCALA 1.00026235674856 MODELO<br>GEOIDAL GGM10 |
| GPS12  | 2263474.478 | 677298.331 | 1612.669 |                                                                                  |
| GPS13  | 2264858.698 | 675896.737 | 1602.421 |                                                                                  |
| GPS14  | 2265616.212 | 674173.870 | 1583.775 |                                                                                  |
| BN32.5 | 2267922.523 | 673117.745 | 1560.653 | SISTEMA TOPOGRAFICO FACTOR DE<br>ESCALA 1.00027257035318 MODELO<br>GEOIDAL GGM10 |
| GPS15  | 2267353.891 | 673188.841 | 1561.442 |                                                                                  |
| GPS16  | 2269069.705 | 672949.008 | 1548.376 |                                                                                  |
| BN37   | 2272241.668 | 671953.106 | 1527.788 |                                                                                  |
| GPS17  | 2270970.962 | 672353.997 | 1526.553 | SISTEMA TOPOGRAFICO FACTOR DE<br>ESCALA 1.00027235512016 MODELO<br>GEOIDAL GGM10 |
| GPS18  | 2272788.247 | 671730.482 | 1530.358 |                                                                                  |
| BN41.5 | 2276013.010 | 670601.289 | 1549.421 |                                                                                  |
| GPS19  | 2276913.779 | 670833.109 | 1585.953 |                                                                                  |
| GPS20  | 2274388.035 | 670235.525 | 1536.495 | SISTEMA TOPOGRAFICO FACTOR DE<br>ESCALA 1.00028146820489 MODELO<br>GEOIDAL GGM10 |

**Fijación de vértices o puntos.** La fijación de vértices en el terreno consiste en localizar puntos estratégicos, para determinar los linderos y calles intermedias en la poligonal. Los puntos localizados se determinaron por medio marcas y señales de fácil ubicación. Estos puntos deben ser colocados de tal manera que se puedan ver al menos, un vértice de adelante y un vértice de atrás como mínimo.

**Levantamiento planimétrico de la poligonal principal.** El objetivo de este levantamiento es el de proporcionar un sistema de coordenadas X-Y convenientemente distribuido en la zona de estudio para apoyar la ubicación precisa de los contornos de cada una de las manzanas, así como los detalles planimétricos que se consideren de interés como pueden ser, árboles, postes, brechas, parcelas entre otros. Los puntos se establecen bajo un sistema de coordenadas basadas en la orientación del Norte magnético.

**Procedimiento de uso de la estación.** Se coloca el instrumento sobre el primer vértice. Al encender el equipo, la plomada laser se encenderá automáticamente, con lo que procederá a nivelarse el equipo hasta que los niveles de burbuja que se encuentran situados en la estación total así lo determinen. Concluida la nivelación se procede a establecer las coordenadas de arranque a partir de los puntos GPS previamente calculados, teniendo en cuenta que se deberán de tener 2 vértices con coordenadas establecidas. Después solo queda obtener la distancia que existe entre nuestro primer vértice y el vértice siguiente, con el fin establecer la línea base.

Establecida esta línea, automáticamente la estación mostrará qué punto es el que mediremos, para lo cual habrá que asignarle la nomenclatura correspondiente, paso seguido, apuntaremos hacia prisma que estará colocado sobre el punto a medir (que puede ser un vértice o una radiación); la estación calculará las coordenadas y las mostrará en la pantalla, solo queda registrarla en la libreta electrónica, tantos puntos sean necesarios. Estos pasos se repetirán tantas veces sean necesarias hasta terminar de tomar todos y cada uno de los vértices establecidos.

**Planos topográficos.** De acuerdo con la extensión del trabajo realizado, y con el objetivo de que el plano sea realmente útil y con el mayor detalle posible, se preferirán escalas grandes o la que más se ajuste a nuestras necesidades.

Se conectará la libreta electrónica a una computadora en la cual se tenga instalado el software que permita la descarga de los datos proporcionado por el fabricante de la estación. Se descargará el archivo de trabajo del levantamiento topográfico. Este archivo será exportado mediante a un archivo con terminación .DWG que corresponde al programa Autocad®.

En este archivo se detallará y se contará con la descripción de cada uno de los vértices, su nomenclatura y coordenadas calculadas. Puesto que este instrumento calcula y compensa todas las poligonales realizadas, no hay la necesidad de calcular ningún polígono. Para mayor nivel de detalle e información respecto a los levantamientos topográficos, ver el Anexo de Topografía. Los planos estarán integrados por una planta donde se integrará la planimetría. Definido el eje de trazo del acueducto, se integrarán los datos correspondientes a los puntos de inflexión y posteriormente se graficará el perfil del terreno natural en base a los cadenamientos determinados previamente. En la lámina 4.4 se puede visualizar el resultado de las láminas topográficas realizadas a lo largo de los 42 kilómetros del Acueducto.

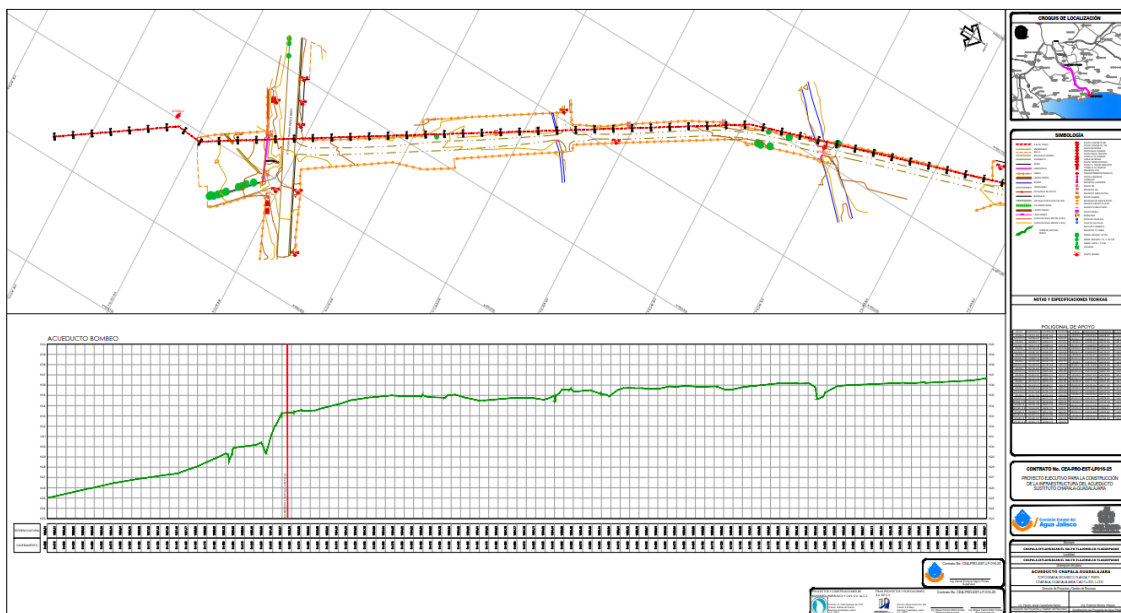


Lámina 4.4 Planos Topográficos



En la figura 4.6 se presenta una fotografía del proceso de los trabajos topográficos donde se representa la toma de datos en un cruce federal.



*Figura 4.6 Fotografía del levantamiento topográfico, cruce federal*

### 4.3. Estudios de Calidad del agua

Con la finalidad de determinar las condiciones del agua del Lago de Chapala, fuente principal de abastecimiento al AMG, se realizaron 8 muestreos en 3 puntos: Canal de Llamada del Lago de Chapala, Tanque de Cambio de Régimen del actual Acueducto Chapala y Tanque de Entrega Cerro del 4. Las muestras se realizaron los días 13 y 26 de agosto y el 18 de septiembre de 2025.

El objetivo de los muestreos realizados es para determinar la tendencia de generar incrustaciones o corrosión por la calidad del agua que se conducirá por el Acueducto. Las determinaciones analíticas se realizaron conforme a la Norma Oficial NOM-127-SSA1-1994, Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua. En la lámina 4.5 se muestra geográficamente la ubicación de los puntos en los que se realizaron los muestreos. Estos puntos fueron el Canal de Llamada del Lago de Chapala, un segundo punto en el Tanque de Cambio de Régimen del actual acueducto y finalmente en el Tanque de Entrega localizado en el Cerro del Cuatro



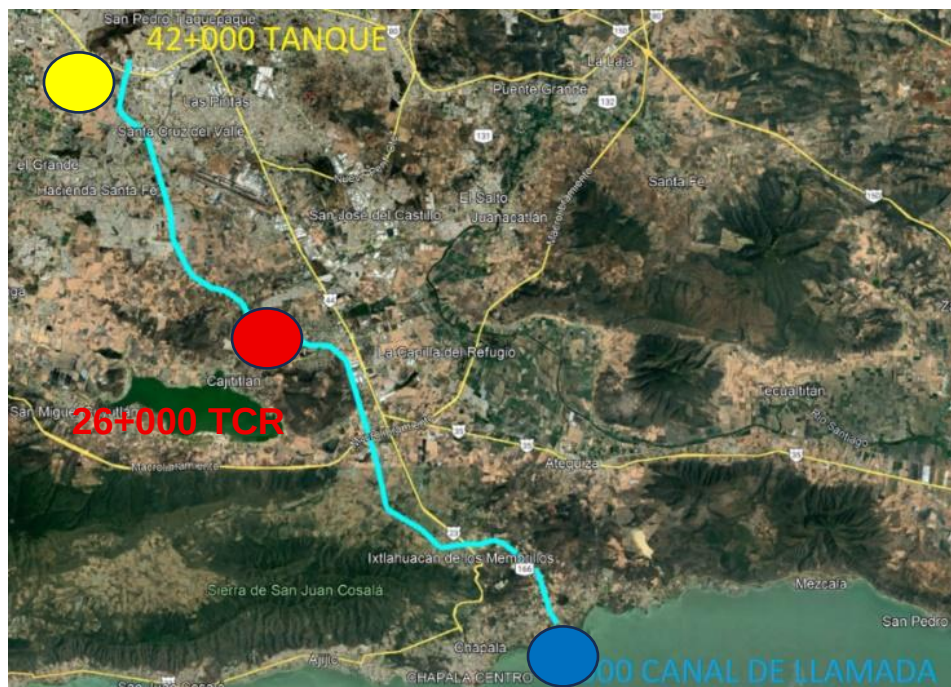


Lámina 4.5 Ubicación de los muestreos de calidad del agua

En la Figura 4.7 se muestra la fotografía de la muestra en el canal de llamada.



*Figura 4.7 Prueba de calidad de agua en Canal de Llamada*

Las muestras fueron realizadas por Laboratorio certificado por EMA No. AG-059-010/10 y aprobación CONAGUA CNA-GCA-2970. Los parámetros solicitados fueron Alcalinidad Total, Calcio Total, Cloruros, Dureza Total, Magnesio Total, Sólidos Disueltos Totales y Sólidos Suspendidos Totales, así como la temperatura y PH determinados en campo. En la tabla 4.7 se muestran los resultados obtenidos para los muestreos en el Canal de Llamada.

*Tabla 4.7 Parámetros de calidad del agua de las muestras tomadas en el Canal de Llamada*

| CANAL DE LLAMADA                |                                       | MUESTRAS            |                     |                     | TOTAL DE MUESTRAS (3): |        |          |              |
|---------------------------------|---------------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|------------------------|--------|----------|--------------|
| Parámetro                       | Unidad                                | Clave 29153/25      | Clave 29458/25      | Clave 300013/25     | Máx.                   | Mín.   | Promedio | PERCENTIL 80 |
| Fecha/hora recepción            | dd/mm/aaaa hh:mm                      | 13/08/2025 15:00 h. | 26/08/2025 15:00 h. | 18/09/2025 16:30 h. |                        |        |          |              |
| <b>Características Físicas</b>  |                                       |                     |                     |                     |                        |        |          |              |
| Color                           | U Pt-Co                               | AMARILLO            | AMARILLO            | AMARILLO            | --                     | --     | --       | --           |
| Temperatura                     | °C                                    | 24.0                | 24.0                | 25.0                | 25.00                  | 24.00  | 24.33    | 24.60        |
| Olor                            | ---                                   | INODORA             | INODORA             | INODORA             | --                     | --     | --       | --           |
| Turbiedad                       | NTU                                   | LIG, TURBIA         | LIG, TURBIA         | LIG, TURBIA         | --                     | --     | --       | --           |
| pH Unidades                     | >7 ácido / <7 alcalino /<br>=7 neutro | 7.3                 | 8.7                 | 7.5                 | 8.7                    | 7.3    | 7.83     | 8.22         |
| <b>Características Químicas</b> |                                       |                     |                     |                     |                        |        |          |              |
| Alcalinidad Total (K)           | mg/L CaCo3                            | 330.18              | 330.22              | 311.53              | 330.22                 | 311.53 | 323.98   | 330.20       |
| Calcio Total (E)                | mg/L Ca                               | 42.03               | 45.91               | 27.95               | 45.91                  | 27.95  | 38.63    | 44.36        |
| Cloruros (G)                    | mg/L Cl                               | 73.69               | 64.60               | 71.94               | 73.69                  | 64.60  | 70.08    | 72.99        |
| Dureza Total (G)                | mg/L CaCo3                            | 191.17              | 191.53              | 197.40              | 197.40                 | 191.17 | 193.37   | 195.05       |
| Magnesio Total (E)              | mg/L Mg                               | 25.65               | 24.27               | 22.77               | 25.65                  | 22.77  | 24.23    | 25.10        |
| Sólidos Disueltos Totales (I)   | mg/L                                  | 645.00              | 661.00              | 641.00              | 661.00                 | 641.00 | 649.00   | 654.60       |
| Sólidos Suspendidos Totales (I) | mg/L                                  | 40.00               | 34.00               | 28.00               | 40.00                  | 28.00  | 34.00    | 37.60        |

En la tabla 4.8 se muestran los resultados obtenidos para los muestreos en el Tanque de Cambio de régimen donde solamente se realizaron 2 muestreos. Finalmente, en la Tabla 4.9 se consignan los valores obtenidos en el Tanque de Entrega.

*Tabla 4.8 Parámetros de calidad del agua de las muestras tomadas en el Tanque de Cambio de Régimen*

| TANQUE DE CAMBIO DE REGIMEN     |                                    | MUESTRAS            |                     | TOTAL DE MUESTRAS (2) |        |          |              |
|---------------------------------|------------------------------------|---------------------|---------------------|-----------------------|--------|----------|--------------|
| Parámetro                       | Unidad                             | Clave 29154/25      | Clave 300014/25     | Máx.                  | Mín.   | Promedio | PERCENTIL 80 |
| Fecha/hora recepción            | dd/mm/aaaa hh:mm                   | 13/08/2025 15:00 h. | 18/09/2025 16:30 h. |                       |        |          |              |
| <b>Características Físicas</b>  |                                    |                     |                     |                       |        |          |              |
| Color                           | U Pt-Co                            | AMARILLO            | AMARILLO            | --                    | --     | --       | --           |
| Temperatura                     | °C                                 | 28.0                | 26.0                | 28.00                 | 26.00  | 27.00    | 27.60        |
| Olor                            | ---                                | INODORA             | INODORA             | --                    | --     | --       | --           |
| Turbiedad                       | NTU                                | LIG, TURBIA         | LIG, TURBIA         | --                    | --     | --       | --           |
| pH Unidades                     | >7 ácido / <7 alcalino / =7 neutro | 7.4                 | 7.3                 | 7.4                   | 7.3    | 7.35     | 7.38         |
| <b>Características Químicas</b> |                                    |                     |                     |                       |        |          |              |
| Alcalinidad Total (K)           | mg/L CaCo3                         | 325.18              | 312.56              | 325.18                | 312.56 | 318.87   | 322.66       |
| Calcio Total (E)                | mg/L Ca                            | 42.49               | 39.51               | 42.49                 | 39.51  | 41.00    | 41.89        |
| Cloruros (G)                    | mg/L Cl                            | 76.21               | 70.61               | 76.21                 | 70.61  | 73.41    | 75.09        |
| Dureza Total (G)                | mg/L CaCo3                         | 198.74              | 201.31              | 201.31                | 198.74 | 200.03   | 200.80       |
| Magnesio Total (E)              | mg/L Mg                            | 25.55               | 23.43               | 25.55                 | 23.43  | 24.49    | 25.13        |
| Sólidos Disueltos Totales (I)   | mg/L                               | 705.00              | 639.31              | 705.00                | 639.31 | 672.16   | 691.86       |
| Sólidos Suspendidos Totales (I) | mg/L                               | 30.00               | 27.69               | 30.00                 | 27.69  | 28.85    | 29.54        |

*Tabla 4.9 Parámetros de calidad del agua de las muestras tomadas en el Tanque de Entrega*

| TANQUE DE ENTREGA               |                                    | MUESTRAS            |                     |                     | TOTAL DE MUESTRAS (3): |        |          |              |
|---------------------------------|------------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|------------------------|--------|----------|--------------|
| Parámetro                       | Unidad                             | Clave 29155/25      | Clave 29460/25      | Clave 30015/25      | Máx.                   | Mín.   | Promedio | PERCENTIL 80 |
| Fecha/hora recepción            | dd/mm/aaaa hh:mm                   | 13/08/2025 15:00 h. | 26/08/2025 15:00 h. | 18/09/2025 16:30 h. |                        |        |          |              |
| <b>Características Físicas</b>  |                                    |                     |                     |                     |                        |        |          |              |
| Color                           | U Pt-Co                            | AMARILLO            | AMARILLO            | AMARILLO            | --                     | --     | --       | --           |
| Temperatura                     | °C                                 | 28.0                | 25.0                | 24.0                | 28.00                  | 24.00  | 25.67    | 26.80        |
| Olor                            | ---                                | INODORA             | INODORA             | INODORA             | --                     | --     | --       | --           |
| Turbiedad                       | NTU                                | LIG, TURBIA         | LIG, TURBIA         | LIG, TURBIA         | --                     | --     | --       | --           |
| pH Unidades                     | >7 ácido / <7 alcalino / =7 neutro | 7.5                 | 8.8                 | 7.6                 | 8.80                   | 7.50   | 7.97     | 8.32         |
| <b>Características Químicas</b> |                                    |                     |                     |                     |                        |        |          |              |
| Alcalinidad Total (K)           | mg/L CaCo3                         | 332.48              | 331.26              | 309.45              | 332.48                 | 309.45 | 324.40   | 331.99       |
| Calcio Total (E)                | mg/L Ca                            | 41.74               | 44.63               | 39.40               | 44.63                  | 39.40  | 41.92    | 43.47        |
| Cloruros (G)                    | mg/L Cl                            | 72.68               | 69.15               | 72.76               | 72.76                  | 69.15  | 71.53    | 72.73        |
| Dureza Total (G)                | mg/L CaCo3                         | 189.28              | 201.31              | 199.35              | 201.31                 | 189.28 | 196.65   | 200.53       |
| Magnesio Total (E)              | mg/L Mg                            | 25.68               | 23.78               | 23.37               | 25.68                  | 23.37  | 24.28    | 24.92        |
| Sólidos Disueltos Totales (I)   | mg/L                               | 678.50              | 696.00              | 656.00              | 696.00                 | 656.00 | 676.83   | 689.00       |
| Sólidos Suspendidos Totales (I) | mg/L                               | 23.50               | 31.00               | 30.00               | 31.00                  | 23.50  | 28.17    | 30.60        |

**Índice de Langelier**

**CEA-PRO-EST-LP-016-25**  
**PROYECTO EJECUTIVO PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LA INFRAESTRUCTURA**  
**DEL ACUEDUCTO SUSTITUTO CHAPALA-GUADALAJARA**

El Índice de Langelier permite conocer la calidad del agua proporcionando información sobre el carácter incrustante o corrosivo del agua y está fundamentado en equilibrios del anhídrido carbónico, bicarbonato-carbonatos, el pH, la temperatura, la concentración de calcio y la salinidad total en el agua. Es un parámetro fundamental para conocer la corrosión o incrustación en las redes de distribución del agua e instalaciones interiores industriales y domésticas.

Los valores nos indican lo siguiente:

- Si el índice es 0: el agua está perfectamente equilibrada. No existe formación de incrustaciones ni eliminación de estas.
- Si el índice es negativo: indica que el agua es corrosiva. Agua no saturada con respecto a carbonato cálcico ( $\text{CaCO}_3$ ). El agua no saturada posee la tendencia de eliminar láminas de carbonato cálcico ( $\text{CaCO}_3$ ) presentes que protegen las tuberías y equipos.
- Si el índice es positivo: indica que el agua es incrustante. Agua supersaturada con respecto a carbonato cálcico ( $\text{CaCO}_3$ ). Posible formación de incrustaciones.

$$IL = pH - pH_s$$

Fórmula para calcular el índice Langelier:

Donde

IL Índice de Langelier

pH del agua

pHs del agua cuando está saturada de Carbonato de Calcio

Para determinar el grado de corrosión o incrustación se utiliza el siguiente criterio:

|                                                   |                              |  |
|---------------------------------------------------|------------------------------|--|
| <b>CUANDO <math>-4 &lt; IL &lt; -1</math></b>     | <b>MUY CORROSIVA</b>         |  |
| <b>CUANDO <math>-1 &lt; IL &lt; -0,3</math></b>   | <b>LEVEMENTE CORROSIVA</b>   |  |
| <b>CUANDO <math>-0,3 &lt; IL &lt; +0,3</math></b> | <b>NEUTRA</b>                |  |
| <b>CUANDO <math>+0,3 &lt; IL &lt; +1,5</math></b> | <b>LEVEMENTE INCRUSTANTE</b> |  |
| <b>CUANDO <math>IL &gt; +1,5</math></b>           | <b>ALTAMENTE INCRUSTANTE</b> |  |

Según los valores obtenidos podremos tomar las siguientes medidas correctivas:

Agua Incrustante: A Partir de +0,5 a +1,5

Medida correctiva: reducir pH o Alcalinidad

Agua Corrosiva: A partir de -0,5 a -1,5

Medida correctiva: aumentar pH o Alcalinidad

### Valores óptimos de agua de consumo

pH: entre 7,2 y 7,6

Alcalinidad (AF): entre 80 y 125 ppm

Dureza (TF): entre 200 y 400 ppm`

De acuerdo con los resultados de las muestras y aplicando las fórmulas correspondientes se obtuvieron los valores del índice de Langelier los cuales se muestran en las Tablas 4.10, 4.11 y 4.12.



Tabla 4.10 Índice de Langelier Canal de Llamada

|                                                    | CANAL DE<br>LLAMADA | CANAL DE<br>LLAMADA      | CANAL DE<br>LLAMADA      |
|----------------------------------------------------|---------------------|--------------------------|--------------------------|
|                                                    | 29153/25            | 29458/25                 | 30013/25                 |
| pH DEL AGUA                                        | 7.30                | 8.70                     | 7.50                     |
| SÓLIDOS DISUELTOS TOTALES (SDT) mg/l               | 645.00              | 661.00                   | 641.00                   |
| TEMPERATURA, °C                                    | 24.00               | 24.00                    | 25.00                    |
| TEMPERATURA (T), °K                                | 297.50              | 297.50                   | 298.50                   |
| DUREZA DE CALCIO COMO CaCO <sub>3</sub> (C), mg/l  | 191.17              | 191.53                   | 197.40                   |
| ALCALINIDAD TOTAL COMO CaCO <sub>3</sub> (A), mg/l | 330.18              | 330.22                   | 311.53                   |
| <b>INDICE DE LANGELIER</b>                         | <b>0.12</b>         | <b>1.52</b>              | <b>0.33</b>              |
|                                                    | NEUTRA              | ALTAMENTE<br>INCRUSTANTE | LEVEMENTE<br>INCRUSTANTE |

Tabla 4.11 Índice de Langelier Tanque de Cambio de Régimen

|                                                    | TCR                      | TCR         |
|----------------------------------------------------|--------------------------|-------------|
|                                                    | 29154/25                 | 300014/25   |
| pH DEL AGUA                                        | 7.40                     | 7.30        |
| SÓLIDOS DISUELTOS TOTALES (SDT) mg/l               | 705.00                   | 639.31      |
| TEMPERATURA, °C                                    | 28.00                    | 26.00       |
| TEMPERATURA (T), °K                                | 301.50                   | 299.50      |
| DUREZA DE CALCIO COMO CaCO <sub>3</sub> (C), mg/l  | 198.74                   | 201.31      |
| ALCALINIDAD TOTAL COMO CaCO <sub>3</sub> (A), mg/l | 325.18                   | 312.56      |
| <b>INDICE DE LANGELIER</b>                         | <b>0.30</b>              | <b>0.16</b> |
|                                                    | LEVEMENTE<br>INCRUSTANTE | NEUTRA      |

Tabla 4.12 Índice de Langelier Tanque de Entrega

|                                                    | TANQUE DE<br>ENTREGA     | TANQUE DE<br>ENTREGA     | TANQUE DE<br>ENTREGA     |
|----------------------------------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
|                                                    | 29155/25                 | 29460/25                 | 300015/25                |
| pH DEL AGUA                                        | 7.50                     | 8.80                     | 7.60                     |
| SÓLIDOS DISUELTOS TOTALES (SDT) mg/l               | 678.50                   | 696.00                   | 656.00                   |
| TEMPERATURA, °C                                    | 24.00                    | 24.00                    | 25.00                    |
| TEMPERATURA (T), °K                                | 297.50                   | 297.50                   | 298.50                   |
| DUREZA DE CALCIO COMO CaCO <sub>3</sub> (C), mg/l  | 189.28                   | 201.31                   | 199.35                   |
| ALCALINIDAD TOTAL COMO CaCO <sub>3</sub> (A), mg/l | 332.48                   | 331.26                   | 309.45                   |
| <b>INDICE DE LANGELIER</b>                         | <b>0.32</b>              | <b>1.64</b>              | <b>0.43</b>              |
|                                                    | LEVEMENTE<br>INCRUSTANTE | ALTAMENTE<br>INCRUSTANTE | LEVEMENTE<br>INCRUSTANTE |

En la tabla 4.13 se muestran los valores promedio en los 3 puntos de muestreo.



*Tabla 4.13 Valores Promedio Índice de Langelier*

| <b>CÁLCULO DEL INDICE DE LANGELIER</b>             | <b>Valores Promedio</b>      |               |                              |
|----------------------------------------------------|------------------------------|---------------|------------------------------|
|                                                    | <b>CANAL DE LLAMADA</b>      | <b>TCR</b>    | <b>TANQUE DE ENTREGA</b>     |
| pH DEL AGUA                                        | 7.83                         | 7.35          | 7.97                         |
| SÓLIDOS DISUELTOS TOTALES (SDT) mg/l               | 649.00                       | 672.16        | 676.83                       |
| TEMPERATURA, °C                                    | 24.33                        | 27.00         | 25.67                        |
| TEMPERATURA (T), °K                                | 297.83                       | 300.50        | 299.17                       |
| DUREZA DE CALCIO COMO CaCO <sub>3</sub> (C), mg/l  | 193.37                       | 200.03        | 196.65                       |
| ALCALINIDAD TOTAL COMO CaCO <sub>3</sub> (A), mg/l | 323.98                       | 318.87        | 324.40                       |
| <b>INDICE DE LANGELIER</b>                         | <b>0.66</b>                  | <b>0.23</b>   | <b>0.83</b>                  |
|                                                    | <b>LEVEMENTE INCRUSTANTE</b> | <b>NEUTRA</b> | <b>LEVEMENTE INCRUSTANTE</b> |

Los resultados obtenidos indican que los valores pueden ser variables a lo largo del año y que es de alta probabilidad de que la calidad de agua impacte en la vida útil del Acueducto como ha pasado en el actual Acueducto. Por lo anterior se considera importante contar con un mantenimiento de limpieza del Acueducto por lo menos cada 2 años. Esto podrá ser factible ya que se contaría con el Acueducto existente y entonces no se interrumpiría el abasto lo que garantiza la vida útil de ambos acueductos al contar con la redundancia.

#### 4.4. Estudios de Geotecnia

Este estudio tiene como finalidad conocer las propiedades físicas y mecánicas de cada estrato que configuran el subsuelo, así como la ubicación del nivel de aguas freáticas (NAF) o agua superficialmente atrapada, boleos de roca o manto, rellenos y su tipo, estratos de alta o baja compacidad o consistencia, según sea el caso, si se encuentran a la profundidad de la exploración. Para en base a ello complementar información geotécnica ya existente en puntos estratégicos mediante la obtención de la estratigrafía del subsuelo y generar recomendaciones para el desplante de la tubería de la línea de conducción. Dentro de los estudios se hace referencia a la geología y a la sismicidad de la zona de estudio que a continuación se describen.

##### 4.4.1 Geología

La línea de conducción está localizada dentro de la provincia Neovolcánica de México, en particular en la subprovincia fisiográfica número 53 de Chapala tal como se muestra en la Figura 4.8. Al sur, en los municipios de Chapala y Ixtlahuacán de los Membrillos se presentan principalmente suelos con un alto contenido de arcillas expansivas, mientras que en el municipio de Tlajomulco se tienen zonas lacustres conformadas principalmente por dos unidades litológicas: Suelos de composición limo-arcillo-arenoso y Piroclásticos finos tobáceos, (jales), constituidos por pseudoestratos arcillo-arenosos de origen volcánico. Finalmente, en el municipio de Tlaquepaque se tendrán suelos formados por material sedimentario aluvial durante el cuaternario, en este sitio se han depositado los materiales transportados desde las estructuras volcánicas que limitan al municipio con la cadena Volcánica del Sur de Guadalajara y al poniente con la Sierra de la Primavera.

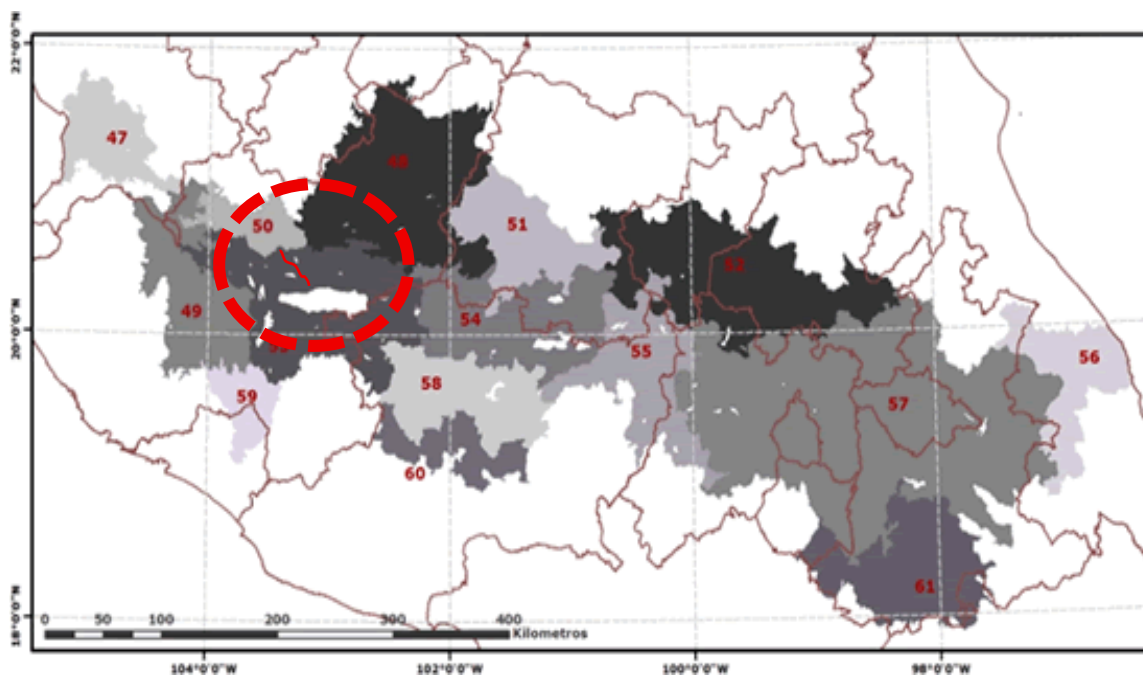


Figura 4.8 Subprovincias fisiográficas dentro de la provincia Neovolcánica de México

Con referencia a las rocas subyacentes que se presentan en la región, son de tipo ígneo, las cuales en su mayoría son secuencias de riolita y tobas ácidas, así como yacimientos basálticos. Estas secuencias ígneas se encuentran cubiertas por depósitos de suelos.

#### 4.4.2 Sismicidad

De acuerdo con la carta sísmica de la República Mexicana (CFE), los municipios de Chapala, Ixtlahuacán de los Membrillos, Tlajomulco y Tlaquepaque, Jalisco, se encuentran en la zona C, caracterizándose por ser una zona intermedia de sismos poco frecuentes. Respecto al marco tectónico regional centro-occidental de la faja volcánica Transmexicana, la línea de conducción se ubica entre el graben de Zacoalco, y el graben y Rift de Chapala, como se muestra en la Figura 4.9

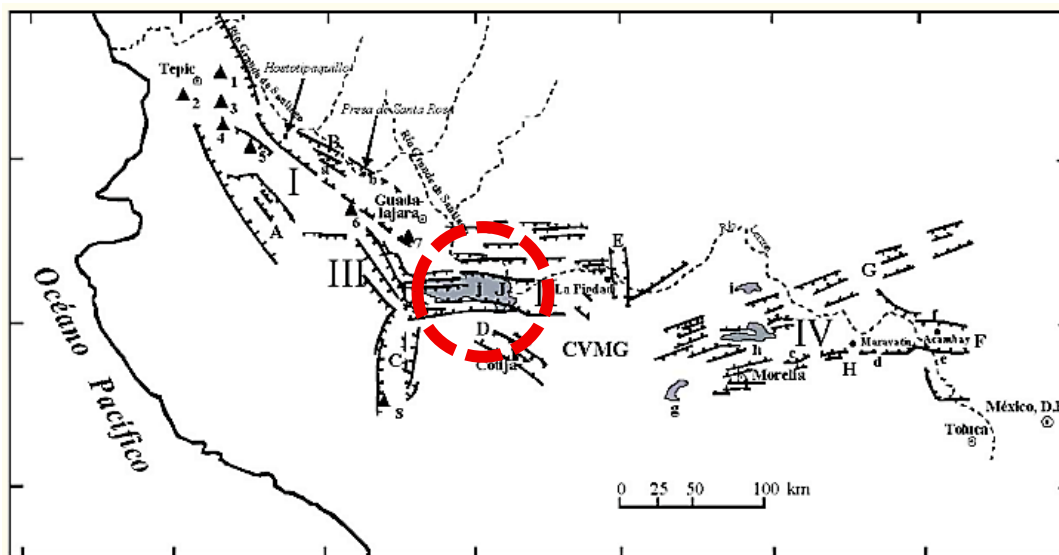


Figura 4.9 Marco tectónico regional centro-occidental de la faja volcánica Transmexicana

La sismicidad de la zona de estudio es de riesgo, ya que se localiza en la zona C de la regionalización sísmica de México propuesta por la CFE. El reglamento de obras públicas de Guadalajara y sus normas complementarias, menciona que se debe emplear el coeficiente sísmico básico  $c = 0.36$  (grupo B), sin embargo, al ser esta infraestructura de alta importancia (grupo A), se deberá usar un  $c = 0.54$  (a consideración del estructurista). En la Figura 4.10 se muestra la zonificación sísmica de la República Mexicana, CFE.



Figura 4.10 Mapa de Regionalización Sísmica República Mexicana CFE



#### 4.4.3 Trabajos de Investigación de Campo

Los sondeos fueron ubicados cubriendo el trazo de la línea de conducción, se programaron 67 sondeos exploratorios directos, 40 mediante penetración estándar (SPT) a 8.0 m de profundidad y 27 mediante pozos a cielo abierto (PCA) a 5.00 m de profundidad. Realizándose estos últimos con perforación con máquina rotatoria mediante broca helicoidal por seguridad en colindancias a la línea de conducción actual y propiedades vecinas. Los sondeos se ubicaron estratégicamente a lo largo de la línea de conducción.

La referencia del sondeo es el nivel actual del terreno ya sea terracería o nivel del pavimento según el caso. La profundidad de los sondeos SPT es variable con valores entre 5.50 a 8.45 metros, y se determinó hasta encontrar el manto de roca, boleos de roca o estratos competentes con valores mayores a 11 golpes en los sondeos de penetración estándar. En los pozos a cielo abierto se realizaron a 5.00 metros de profundidad, suficiente para el alcance del estudio y tipo de proyecto.

Para las pruebas SPT basadas a las normas ASTM D 1586 y D 6066, con muestreo alterado por medio del muestreador de cuchara abierta (tubo partido)  $\varnothing = 2"$  y 60 cm de longitud y para las muestras inalteradas, con tubo de pared delgada (tipo Shelby), mismos que se hincan en el terreno mediante la energía que proporciona un martinete de 63.5 kg de peso (sistema de percusión), el cual se deja caer libremente de una altura constante de 76 cm y al contar el número de golpes (N) necesarios para que penetre 30 cm, se conoce la compacidad o consistencia del subsuelo explorado, además de correlaciones para determinar el ángulo de fricción interno del material. El avance de los sondeos en suelo se realiza con broca helicoidal sólida (auger) de  $\varnothing = 6"$  y en material cementado o roca intemperizada con broca helicoidal con puntas de tungsteno, en manto de roca con barril de pared doble de diamante tipo NW. La máquina de perforación rotatoria empleada para los trabajos de exploración fue la modelo BK 51-HD de la marca Brainard Kilman, montada en camión Kodiak de 10 toneladas.

Se hicieron además las observaciones necesarias a fin de detectar la presencia de materiales de relleno, encontrándose en varios de los sondeos (>50%), relleno limpio (vialidades) a profundidad variable de 0.60 m a 2.60 m.

Respecto al nivel de aguas freáticas (NAF) o agua atrapada (o colgada) se localizó en 8 sondeos a profundidad variable, 2.50 a 6.30 m, principalmente en zonas con depresión topográfica, entre elevaciones de colinas (zonas de valles) o bien en zonas lacustres donde se acumula el agua. No se encontraron oquedades, fisuras o cavernas que pongan en riesgo la estructura a construir.

Se obtuvieron muestras alteradas e inalteradas directamente con el equipo SPT y tubo de pared delgado, respectivamente, determinándose su humedad en campo y una primera clasificación visual y al tacto. Ya en laboratorio se efectuaron los ensayos correspondientes.

En la lámina 4.6 se muestran algunas de las ubicaciones de los sondeos SPT a lo largo de la línea de conducción y también puede observarse en la Figura 4.11 una fotografía del proceso de campo del sondeo S-7C.



Lámina 4.6 Ubicación de SPT a lo largo del eje de trazo del Acueducto



Figura 4.11 Fotografía del Sondeo 7C



En la tabla 4.14 se indica la ubicación de cada uno de los sondeos SPT realizados mediante sus coordenadas UTM (13Q, datum WGS-84, error  $\pm 3$  m) e información sobre las profundidades de los mismos y una caracterización general de los estratos de cada uno de los mismos.

*Tabla 4.14 Ubicación y Profundidades de Sondeos SPT*

| Sondeo No. | Cad.   | UBICACIÓN |           | Prof. Estratos blandos/sueltos | Prof. Relleno | Prof. Agua | Prof. Roca / boleos | Prof. total sondeo |
|------------|--------|-----------|-----------|--------------------------------|---------------|------------|---------------------|--------------------|
|            |        | ESTE (X)  | NORTE (Y) |                                |               |            |                     |                    |
| S-1A       | --     | 693,191   | 2'248,271 | --                             | --            | --         | --                  | 8.45 m             |
| S-1        | 2+518  | 692,681   | 2'249,896 | 1.00 m a 2.00 m                | --            | --         | --                  | 8.45 m             |
| S-1C       | 2+927  | 692,543   | 2'250,287 | --                             | --            | --         | --                  | 8.03 m             |
| S-2        | 3+071  | 692,396   | 2'250,350 | 0.00 m a 0.45 m                | --            | --         | 5.20 m              | 8.00 m             |
| S-1N       | --     | 691,873   | 2'250,679 | --                             | --            | --         | 2.00 m              | 8.00 m             |
| S-2C       | 4+282  | 691,596   | 2'251,138 | 0.00 m a 1.00 m                | --            | --         | 1.02 m              | 5.50 m             |
| S-3C       | 5+463  | 690,613   | 2'251,820 | --                             | --            | --         | --                  | 8.45 m             |
| S-4        | 5+788  | 690,331   | 2'251,896 | --                             | 0.90 m        | 4.20 m     | --                  | 8.45 m             |
| S-4C       | 5+937  | 690,167   | 2'251,903 | 4.00 m a 5.00 m                | 0.60 m        | 4.40 m     | --                  | 8.45 m             |
| S-5        | 6+509  | 689,338   | 2'251,755 | 4.00 m a 6.00 m                | 2.00 m        | 4.40 m     | --                  | 8.45 m             |
| S-5C       | 7+395  | 688,714   | 2'251,703 | 2.00 m a 3.00 m                | 2.10 m        | --         | --                  | 8.45 m             |
| S-6        | 8+062  | 688,060   | 2'251,590 | 0.00 m a 0.45 m                | --            | --         | 6.20 m              | 6.20 m             |
| S-7        | 8+434  | 687,693   | 2'251,531 | 0.00 m a 3.00 m                | --            | --         | 7.20 m              | 7.20 m             |
| S-8        | 9+201  | 687,050   | 2'251,825 | 0.00 m a 0.45 m                | 0.60 m        | --         | --                  | 8.45 m             |
| S-9        | 10+027 | 686,453   | 2'252,395 | 0.00 m a 0.45 m                | 0.80 m        | --         | --                  | 8.45 m             |
| S-10       | 10+879 | 685,724   | 2'252,834 | --                             | 0.60 m        | 6.30 m     | --                  | 8.45 m             |
| S-11       | 10+879 | 689,599   | 2'251,740 | 0.00 m a 0.45 m                | --            | --         | --                  | 8.20 m             |
| S-12       | 11+330 | 685,330   | 2'253,053 | 0.00 m a 0.45 m                | --            | --         | --                  | 8.07 m*            |
| S-6C       | 12+167 | 684,608   | 2'253,484 | --                             | 0.70 m        | --         | --                  | 8.45 m             |
| S-13       | 14+081 | 684,134   | 2'255,333 | 0.00 m a 0.45 m                | --            | 3.00 m     | 8.05 m              | 8.05 m*            |
| S-14       | 16+396 | 683,459   | 2'257,669 | 0.00 m a 8.45 m                | 0.90 m        | 4.00 m     | --                  | 8.45 m             |
| S-15       | 19+709 | 682,545   | 2'260,591 | --                             | --            | --         | 5.60 m              | 8.00 m             |
| S-7C       | 20+297 | 682,341   | 2'261,259 | --                             | 0.40 m        | --         | 1.60 m              | 8.00 m             |
| S-16       | 21+056 | 681,740   | 2'261,740 | --                             | --            | --         | 1.30 m              | 8.20 m             |
| S-15A      | 21+680 | 681,214   | 2'262,012 | 0.00 m a 2.00 m                | 0.70 m        | --         | 5.50 m              | 8.00 m             |
| S-8C       | 22+499 | 680,991   | 2'262,036 | --                             | --            | --         | --                  | 8.45 m*            |
| S-2N       | --     | 680,215   | 2'262,115 | --                             | 1.20 m        | --         | 4.70 m              | 8.00 m             |
| S-16A      | 23+829 | 679,178   | 2'262,623 | --                             | 0.60 m        | --         | --                  | 8.37 m             |
| S-17       | 24+168 | 678,882   | 2'262,730 | 0.00 m a 4.00 m                | --            | --         | --                  | 8.45 m             |
| S-18       | 26+478 | 676,959   | 2'263,733 | --                             | --            | --         | 1.10 m              | 8.43 m             |
| S-9C       | 27+846 | 676,004   | 2'264,823 | --                             | 0.70 m        | --         | 1.60 m              | 8.00 m             |
| S-10C      | 28+684 | 675,168   | 2'264,999 | 1.00 m a 2.00 m                | 1.90 m        | --         | --                  | 8.45 m             |
| S-19       | 29+535 | 674,488   | 2'265,433 | 3.00 m a 4.00 m                | 0.80 m        | 2.50 m     | 4.45 m              | 8.45 m             |
| S-11C      | 29+830 | 674,204   | 2'265,617 | --                             | 0.80 m        | --         | 2.45 m              | 5.45 m             |
| S-19A      | 31+300 | 673,457   | 2'266,865 | --                             | 0.70 m        | --         | --                  | 8.00 m*            |
| S-12C      | 31+992 | 673,150   | 2'267,479 | 0.00 m a 3.00 m                | 1.20 m        | --         | 6.10 m              | 8.10 m             |
| S-20       | 32+980 | 673,020   | 2'268,486 | --                             | 2.60 m        | --         | 2.60 m              | 8.00 m             |
| S-13C      | 33+414 | 672,991   | 2'268,847 | 0.00 m a 1.00 m                | --            | --         | 7.20 m              | 7.20 m             |
| S-21       | 35+083 | 672,471   | 2'270,534 | --                             | 0.90 m        | 4.30 m     | --                  | 8.45 m             |
| S-21A      | --     | 672,059   | 2'271,838 | 0.00 m a 3.00 m                | 1.00 m        | --         | --                  | 8.45 m             |

\*Sondeo con presencia importante de material intemperizado

De igual forma en la lámina 4.7 se indican las de algunos de los PCA realizados y en la Figura 4.12 se muestra la fotografía de la realización del PCA 8C



*Lámina 4.7 Ubicación de PCA a lo largo del eje de trazo del Acueducto*



*Figura 4.12 Fotografía del PCA 8C*



En la tabla 4.15 se indica la ubicación de cada uno de los PCA realizados mediante sus coordenadas UTM (13Q, datum WGS-84, error  $\pm 3$  m) e información de las profundidades. Se puede observar la profundidad en donde se localizaron boleos.

*Tabla 4.15 Ubicación y Profundidades de Sondeos PCA*

| Sondeo No. | UBICACIÓN |           | Prof. Estratos blandos/sueltos | Prof. Relleno limpio | Prof. Agua | Prof. Roca / boleos | Prof. total sondeo |
|------------|-----------|-----------|--------------------------------|----------------------|------------|---------------------|--------------------|
|            | ESTE (X)  | NORTE (Y) |                                |                      |            |                     |                    |
| PCA-1A-1   | 693,039   | 2'248,760 | --                             | 0.90 m               | --         | --                  | 5.00 m             |
| PCA-1A-2   | 692,886   | 2'249,255 | --                             | 1.20 m               | --         | --                  | 5.00 m             |
| PCA2C-1    | 691,161   | 2'251,445 | --                             | --                   | --         | --                  | 5.00 m             |
| PCA-5C1    | 688,437   | 2'251,655 | --                             | --                   | --         | --                  | 5.00 m             |
| PCA-5C2    | 688,260   | 2'251,628 | --                             | --                   | --         | --                  | 5.00 m             |
| PCA-6      | 687,916   | 2'251,568 | --                             | 0.20 m               | --         | --                  | 5.00 m             |
| PCA-7      | 687,539   | 2'251,506 | --                             | --                   | --         | --                  | 5.00 m             |
| PCA-8      | 687,255   | 2'251,634 | --                             | --                   | --         | 4.60 m              | 5.00 m             |
| PCA-9      | 686,774   | 2'252,087 | --                             | --                   | --         | --                  | 5.00 m             |
| PCA-10-1   | 686,277   | 2'252,517 | --                             | 0.40 m               | --         | --                  | 5.00 m             |
| PCA-10-2   | 685,958   | 2'252,705 | --                             | --                   | --         | --                  | 5.00 m             |
| PCA-11     | 685,518   | 2'252,946 | --                             | --                   | --         | --                  | 5.00 m             |
| PCA-14-1   | 683,296   | 2'258,205 | --                             | --                   | --         | --                  | 5.00 m             |
| PCA-14-2   | 683,049   | 2'259,029 | --                             | 0.40 m               | --         | 2.10 m              | 5.00 m             |
| PCA-14-3   | 682,757   | 2'259,950 | --                             | --                   | --         | 0.00 m              | 5.00 m             |
| PCA-15A    | 681,045   | 2'262,043 | --                             | --                   | --         | --                  | 5.00 m             |
| PCA-8C-1   | 680,812   | 2'262,015 | --                             | --                   | --         | --                  | 5.00 m             |
| PCA-8C-2   | 680,521   | 2'262,028 | --                             | --                   | --         | 1.60 m              | 5.00 m             |
| PCA-2N-1   | 679,900   | 2'262,254 | --                             | --                   | --         | --                  | 5.00 m             |
| PCA-2N-2   | 679,570   | 2'262,407 | --                             | --                   | --         | --                  | 5.00 m             |
| PCA-19     | 678,266   | 2'263,018 | --                             | --                   | --         | --                  | 5.00 m *           |
| PCA-20     | 677,333   | 2'263,437 | --                             | --                   | --         | 0.70 m              | 5.00 m             |
| PCA-21     | 676,590   | 2'264,402 | --                             | --                   | --         | --                  | 5.00 m             |
| PCA-22     | 674,040   | 2'265,877 | --                             | --                   | --         | 0.95 m              | 5.00 m             |
| PCA-16     | 673,738   | 2'266,344 | --                             | 0.60 m               | --         | 2.00 m              | 5.00 m             |
| PCA-17     | 673,070   | 2'267,985 | --                             | 0.70 m               | --         | --                  | 5.00 m             |
| PCA-18     | 672,705   | 2'269,799 | --                             | --                   | --         | --                  | 5.00 m             |

\*Sondeo con presencia importante de material intemperizado

## 4.4.4 Estratigrafía

El material encontrado es variable entre sondeos, aunque en ciertas zonas se mantiene una tendencia clara entre estratos, con ligeras variaciones en espesores y por lo tanto profundidad. En la figura 4.13 se muestra una gráfica donde se puede observar la información obtenida en cada uno de los sondeos realizados.

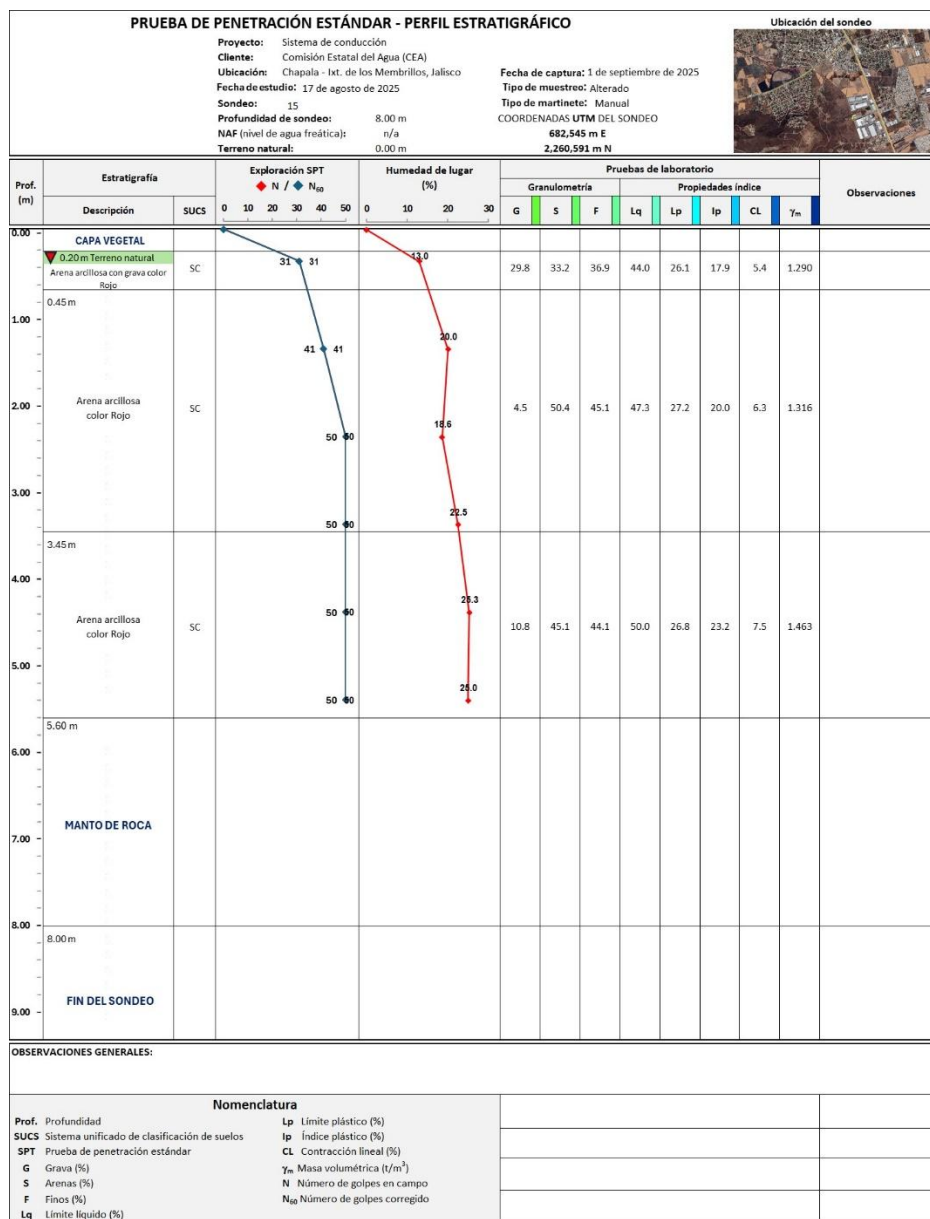


Figura 4.13 Estratigrafía del Sondeo S-15

A partir de los datos obtenidos se realizaron los perfiles estratigráficos a lo largo de la línea de conducción los cuales fueron graficados. En la figura 4.14 se puede observar la información obtenida en un tramo del Acueducto.

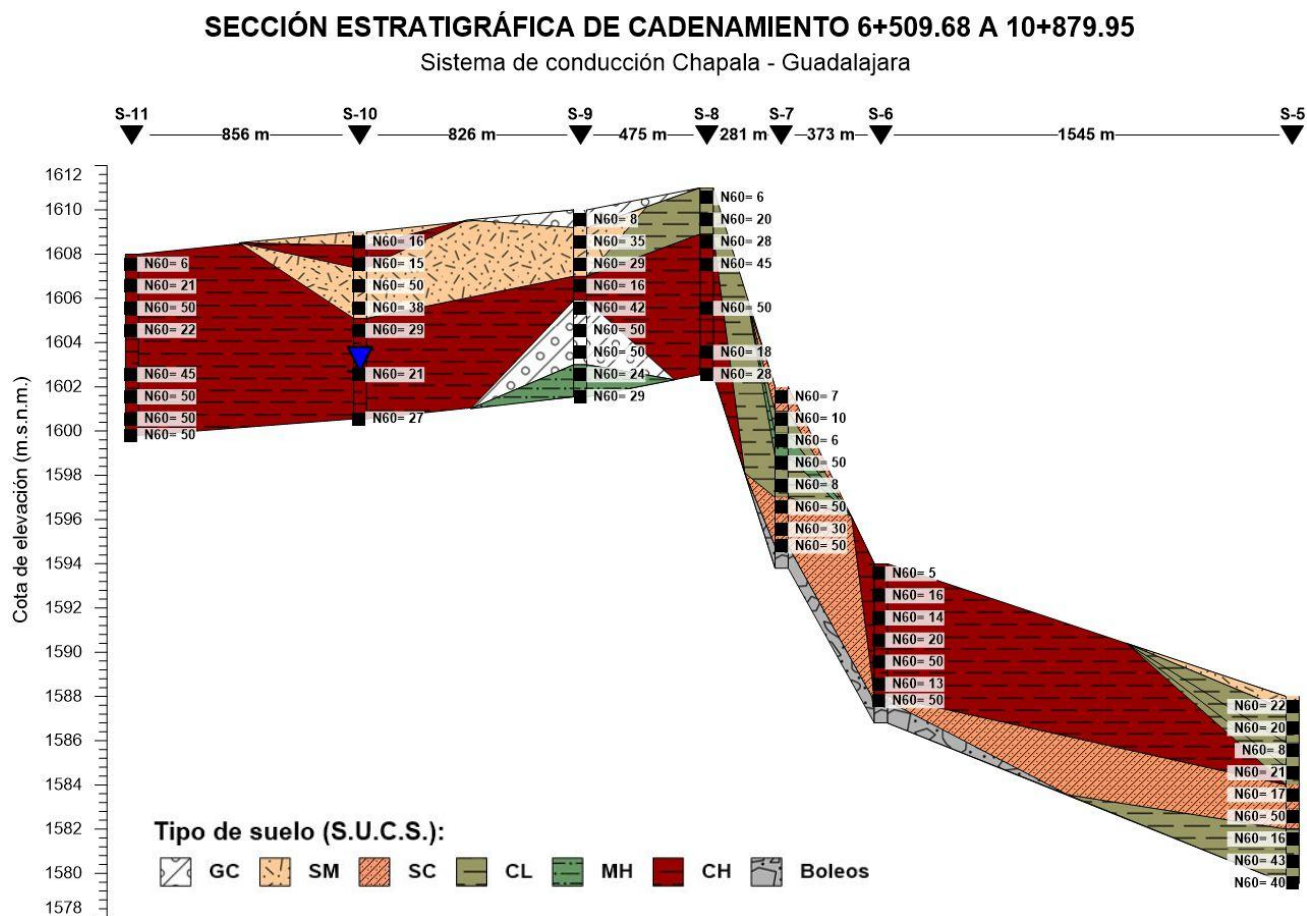


Figura 4.14 Sección Estratigráfica Eje de Trazo del Acueducto

Con el objeto de definir con suficiente aproximación el valor y variación de las propiedades del subsuelo que intervienen en la valuación de la capacidad de carga, se realizaron ensayos a las muestras alteradas. Estos ensayos consistieron en granulometría y límites de consistencia para su clasificación SUCS, masa volumétrica húmeda y contenido de agua (porcentaje de humedad).

El material que se tiene en el suelo como terreno natural está compuesto por arcillas de baja a muy alta compresibilidad (CL y CH1), arenas arcillosas, limosas y mal graduadas (SC, SM y SP), limos inertes y elásticos (ML y MH), y grava arcillosa, limosa y mal graduadas (GC, GM y GP). Los materiales están localizados en estratos definidos con las siguientes propiedades.

A manera de resumir la información obtenida en la Tabla 4.16 se muestran los resultados de los ensayos obtenidos de los SPT indicándose el color, tamaño de partículas, condiciones de masa volumétrica y humedad en el lugar, límites de consistencia y coeficientes de permeabilidad. En la Tabla 4.17 se muestran los valores obtenidos en los PCA.

*Tabla 4.16 Propiedades de Materiales de los SPT*

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                                                                 |        |                           |        |                        |        |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|--------|---------------------------|--------|------------------------|--------|
| COLOR DE LOS MATERIALES                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | Café, negro, beige, rojo, gris, beige, verde y amarillo, con tonos entre ellos. |        |                           |        |                        |        |
| TAMAÑO DE SUS PARTÍCULAS                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | GRAVA %                                                                         |        | ARENA %                   |        | FINOS %                |        |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | MÍNIMO                                                                          | MÁXIMO | MÍNIMO                    | MÁXIMO | MÍNIMO                 | MÁXIMO |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 0.0                                                                             | 80.1   | 0.1                       | 92.0   | 8.0                    | 99.9   |
| En general, el tamaño de las partículas de suelo de la exploración es 50% finos (limos y arcillas), en menor proporción (32%) conformado por arenas y finalmente, se tiene 18% de gruesos (gravas de material intemperizado), localizadas principalmente en zonas donde aflora la roca/boleos.                                                                                                                                                     |                                                                                 |        |                           |        |                        |        |
| MASA VOLUMÉTRICA HÚMEDA DEL LUGAR                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | MÍNIMO kg/m³                                                                    |        | MÁXIMO kg/m³              |        | PROMEDIO kg/m³         |        |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 961                                                                             |        | 2,052                     |        | 1,578                  |        |
| HUMEDAD NATURAL                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | MÍNIMO %                                                                        |        | MÁXIMO %                  |        | PROMEDIO %             |        |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 2.04                                                                            |        | 102.8                     |        | 25.7                   |        |
| En general la humedad es mayor en sondeos donde se tiene presencia de agua, especialmente en estratos profundos (>5 m). Estos sondeos se localizan principalmente en zonas de depresión topográfica entre elevaciones colinares (valles) o zonas lacustres, donde se acumula el agua.                                                                                                                                                              |                                                                                 |        |                           |        |                        |        |
| LÍMITES DE CONSISTENCIA                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | LÍMITE LIQUIDO %                                                                |        | ÍNDICE PLÁSTICO %         |        | CONTRACCION LINEAL %   |        |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | MÍNIMO                                                                          | MÁXIMO | MÍNIMO                    | MÁXIMO | MÍNIMO                 | MÁXIMO |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 25.2                                                                            | 120.6  | 4.5                       | 78.3   | 0.0                    | 24.1   |
| La compresibilidad del subsuelo varía de baja a muy alta, dependiendo de la naturaleza de los materiales que lo conforman. El 31% de los estratos evaluados son materiales de alta a muy alta compresibilidad. El 69% restante, principalmente arcillas, arenas y gravas (material intemperizado) es de baja y media compresibilidad.                                                                                                              |                                                                                 |        |                           |        |                        |        |
| COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | MÍNIMO (cm/s)                                                                   |        | MÁXIMO (cm/s)             |        | PROMEDIO (cm/s)        |        |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 1.57 x 10 <sup>-4</sup>                                                         |        | 231.04 x 10 <sup>-4</sup> |        | 5.4 x 10 <sup>-4</sup> |        |
| Basándonos en los estudios de Allen Hazen, se tienen que la permeabilidad de los materiales del suelo es media en estratos de gravas, arenas mal graduadas y arenas con alto porcentaje de gruesos (>25%). Permeabilidad baja en estratos de arenas limosas y arcillosas (arenas sucias) y muy baja a nula permeabilidad en las arcillas y limos, por su contenido de finos y misma naturaleza (arcilla cohesiva e importante contenido de finos). |                                                                                 |        |                           |        |                        |        |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                                                                       |               |                          |               |                             |               |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|---------------|--------------------------|---------------|-----------------------------|---------------|
| <b>COLOR DE LOS MATERIALES</b>                                                                                                                                                                                                                                                                       | Café, negro, beige, rojo, gris, beige y verde, con tonos entre ellos. |               |                          |               |                             |               |
| <b>TAMAÑO DE SUS PARTÍCULAS</b>                                                                                                                                                                                                                                                                      | <b>GRAVA %</b>                                                        |               | <b>ARENA %</b>           |               | <b>FINOS %</b>              |               |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | <b>MÍNIMO</b>                                                         | <b>MÁXIMO</b> | <b>MÍNIMO</b>            | <b>MÁXIMO</b> | <b>MÍNIMO</b>               | <b>MÁXIMO</b> |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 0.0                                                                   | 61.1          | 0.7                      | 73.3          | 13.2                        | 99.3          |
| En general, el tamaño de las partículas de suelo de las exploraciones PCA es 80% finos (limos y arcillas). En menor proporción (17%) conformado por arenas y finalmente, se tiene 3% de gruesos (gravas en material intemperizado), localizadas principalmente en zonas donde aflora la roca/boleos. |                                                                       |               |                          |               |                             |               |
| <b>MASA VOLUMÉTRICA HÚMEDA DEL LUGAR</b>                                                                                                                                                                                                                                                             | <b>MÍNIMO kg/m³</b>                                                   |               | <b>MÁXIMO kg/m³</b>      |               | <b>PROMEDIO kg/m³</b>       |               |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 923                                                                   |               | 1,810                    |               | 1,519                       |               |
| <b>LÍMITES DE CONSISTENCIA</b>                                                                                                                                                                                                                                                                       | <b>LÍMITE LIQUIDO %</b>                                               |               | <b>ÍNDICE PLÁSTICO %</b> |               | <b>CONTRACCION LINEAL %</b> |               |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | <b>MÍNIMO</b>                                                         | <b>MÁXIMO</b> | <b>MÍNIMO</b>            | <b>MÁXIMO</b> | <b>MÍNIMO</b>               | <b>MÁXIMO</b> |



|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |      |      |     |      |     |      |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|------|-----|------|-----|------|
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 19.2 | 79.5 | 2.3 | 42.8 | 0.0 | 16.6 |
| La compresibilidad del subsuelo varía de baja a alta, dependiendo de la naturaleza de los materiales que lo conforman. El 50% de los estratos evaluados son materiales de alta compresibilidad. El 50% restante, principalmente arcillas, arenas y gravas (material intemperizado) es de baja y media compresibilidad. |      |      |     |      |     |      |

*Tabla 4.17 Propiedades de Materiales de los PCA*

#### 4.4.5 Clasificación de los Materiales para Excavación

El suelo según la facilidad para excavar se clasifica dependiendo de sus características, como lo son el tamaño de sus partículas, densidad, resistencia y origen, entre otros factores, se dan 3 clasificaciones, como se indica enseguida.

- **Material Tipo I:** Suelo blando, conformado por arcilla o limo, o bien una combinación de ambos. Se puede extraer con herramientas manuales, como lo es con pico y pala.
- **Material Tipo II:** Conformado por arena, grava, arcilla consolidada o una combinación de los anteriores, formando un material semi-blando. Se puede extraer con maquinaria pesada (excavadora).
- **Material Tipo III:** Conformado por piedra, siendo este material de alta dureza. Su extracción requiere de métodos especializados como lo son, excavadoras equipadas con martillo hidráulico, explosivos y/o químicos expansivos.

De acuerdo con las propiedades de los materiales estudiados en laboratorio, exploraciones y pruebas en campo, se podrán encontrar zonas de los tres tipos de suelos, siendo un proyecto con **MATERIALES EXPLORADOS DE TIPO MIXTO**. Los porcentajes de los materiales ensayados y clasificados mediante el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) se muestra en la Figura 4.15 donde se puede observar que el 44% son arcillas de las cuales el 27% son de alta compresibilidad. Las arenas suman un 32%, se presentan gravas en un 18% y limos en un 6%.

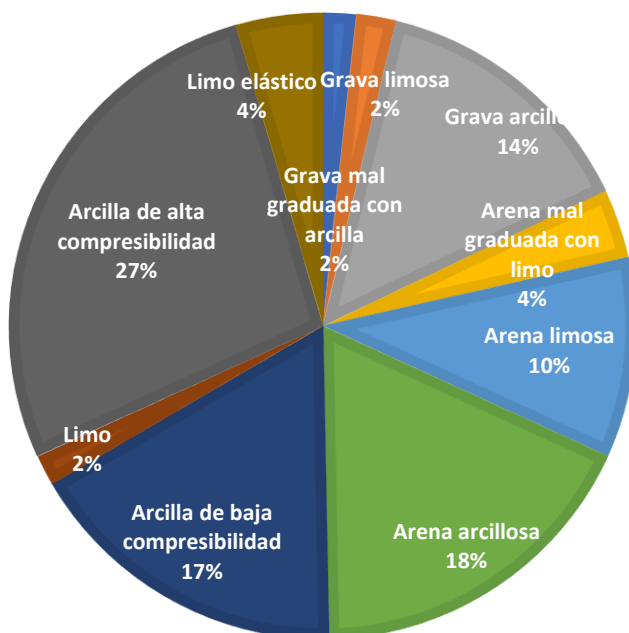


Figura 4.15 Porcentajes según Clasificación SUCS de Materiales

#### 4.4.6 Ensayos de Laboratorio

##### Gravedad específica de las partículas sólidas.

La determinación de la gravedad específica de las partículas sólidas de los suelos es una prueba básica de laboratorio que permite establecer la relación entre el peso de un volumen dado de sólidos del suelo y el peso del mismo volumen de agua a temperatura estándar. Esta propiedad es esencial para el análisis de diversas características del suelo, incluyendo su clasificación, el cálculo de la relación de vacíos, la determinación de la densidad seca máxima, así como la evaluación del comportamiento de consolidación y asentamientos. La prueba se realiza conforme a la norma ASTM D854, utilizando métodos de picnómetro con muestras secas finas o pulverizadas, en condiciones controladas de laboratorio (20°C). Su resultado permite definir el valor del peso específico relativo de las partículas sólidas (Gs).

En la Tabla 4.18 se presentan los resultados de las pruebas realizadas con base en las muestras inalteradas obtenidas y analizadas en laboratorio.

Tabla 4.18 Resultados de Gravedad específica de las partículas sólidas.

| Sondeo No. | Prof. (m) | G 20°C |
|------------|-----------|--------|
|------------|-----------|--------|

|       |                 | (Gravedad específica de los sólidos) |
|-------|-----------------|--------------------------------------|
| S-11  | 4.30 m - 5.00 m | 2.532                                |
| S-5   | 3.00 m - 3.70 m | 2.552                                |
| S-14  | 2.00 m - 2.70 m | 2.498                                |
| S-14  | 3.00 m - 3.70 m | 2.563                                |
| S-1A  | 3.00 m - 3.70 m | 2.643                                |
| S-4   | 3.00 m - 3.70 m | 2.612                                |
| S-01C | 3.00 m - 3.70 m | 2.657                                |
| S-4   | 4.00 m - 4.70 m | 2.569                                |
| S-10  | 7.00 m - 7.60 m | 2.464                                |
| S-10C | 3.00 m - 3.40 m | 2.336                                |
| S-16A | 3.00 m - 3.70 m | 2.536                                |
| S-17  | 3.00 m - 3.70 m | 2.354                                |
| S-12C | 2.00 m - 2.50 m | 2.388                                |
| S-21A | 2.00 m - 2.70 m | 2.365                                |
| PCA-6 | 4.00 m - 4.70 m | 2.426                                |
| S-6C  | 4.90 m - 5.60 m | 2.298                                |
| S-3C  | 4.00 m - 4.70 m | 2.274                                |
| S-8   | 4.00 m - 4.70 m | 2.514                                |

## Contenido de Cloruros y Sulfatos

La prueba de **Determinación de cloruros solubles en agua (UNE-EN 1744-1, Apartado 7)** es un ensayo de laboratorio que permite cuantificar la concentración de cloruros disueltos en el suelo, evaluando su potencial corrosivo frente a materiales como el concreto o el acero en cimentaciones. Por su parte, la **Determinación cuantitativa del contenido de sulfatos en un suelo (UNE 103-201 + Err)** se realiza para medir la presencia de sulfatos, los cuales pueden generar reacciones químicas perjudiciales. En la Tabla 4.19 se presentan los resultados de las pruebas realizadas con base en las muestras inalteradas obtenidas y analizadas en laboratorio. Los niveles de cloruros obtenidos sobre todo en el sondeo 8 presenta riesgo de corrosión a la tubería de acero por lo que se tomarán medidas preventivas mediante un sistema de protección catódica. Los sulfatos no presentan riesgo alguno.

Tabla 4.19. Resultados de contenido de cloruros y sulfatos.

| Sondeo No. | Prof. (m)       | Cl (Cloruros) (%) | SO3 (Sulfatos) (%) |
|------------|-----------------|-------------------|--------------------|
| S-8        | 4.00 m - 4.70 m | 0.024             | 0.00               |
| S-8        | 6.00 m - 6.70 m | 0.018             | 0.00               |
| S-10       | 5.00 m - 5.70 m | 0.013             | 0.00               |
| S-11       | 4.30 m - 5.00 m | 0.010             | 0.00               |

## Potencial de Hidrógeno PH del Suelo

La prueba de **Determinación del pH del suelo (UNE 103-300)** es un ensayo de laboratorio que mide la acidez o alcalinidad del terreno, lo que permite evaluar su potencial reactivo frente a materiales de construcción como el concreto y el acero. Este análisis es crucial para identificar posibles efectos corrosivos o reacciones químicas adversas que puedan comprometer la estabilidad y durabilidad de las estructuras geotécnicas. A continuación, en la Tabla 4.20 se presentan los resultados de las pruebas realizadas con base en las muestras obtenidas en sondeos y analizadas. Los valores obtenidos indican que el suelo se localiza entre ligeramente ácido y ligeramente alcalino lo que no representa gran riesgo de corrosión.

Tabla 4.20. Resultados de pH del suelo

| Sondeo No. | Prof. (m) | pH   |
|------------|-----------|------|
| S-5        | 4.00 m    | 6.90 |
| S-6        | 4.00 m    | 7.08 |
| S-7        | 4.00 m    | 7.04 |
| S-8        | 4.00 m    | 6.80 |
| S-9        | 4.00 m    | 7.26 |
| S-10       | 4.00 m    | 7.34 |
| S-11       | 4.00 m    | 7.47 |
| PCA-8      | 3.00 m    | 7.20 |

## Ensayos Triaxiales

Se ejecutaron **Ensayos Triaxiales No consolidado- No drenado (Tipo UU)**, con el objetivo de determinar el ángulo de fricción y la cohesión de la arcilla en condiciones no drenadas (corto plazo), además de condiciones de humedad, para con ello determinar capacidad de carga del suelo. En la Tabla 4.21 se muestran los valores obtenidos los cuales nos servirán para las recomendaciones de construcción en los elementos estructurales del acueducto como atraques, desplante de estructuras y determinación de los taludes de la cepa de excavación.

| Sondeo No. | Profundidad (m) | Humedad Inicial (%) | Ángulo de fricción (grados) | Cohesión del suelo (kPa) |
|------------|-----------------|---------------------|-----------------------------|--------------------------|
| S-11       | 4.30 m - 5.00 m | 29.2                | 13.0                        | 26.8                     |
| S-14       | 2.00 m - 2.70 m | 57.9                | 12.6                        | 39.9                     |
| S-14       | 3.00 m - 3.70 m | 23.2                | 19.8                        | 57.2                     |
| S-1A       | 3.00 m - 3.70 m | 25.4                | 19.2                        | 129.0                    |
| S-01C      | 3.00 m - 3.70 m | 16.5                | 27.3                        | 71.2                     |



Tabla

|       |                 |      |      |       |
|-------|-----------------|------|------|-------|
| S-4   | 4.00 m - 4.70 m | 17.8 | 31.6 | 69.3  |
| S-10  | 7.00 m - 7.60 m | 46.4 | 7.4  | 67.8  |
| S-10C | 3.00 m - 3.40 m | 40.4 | 29.4 | 79.1  |
| S-16A | 3.00 m - 3.70 m | 26.8 | 28.8 | 104.4 |
| S-17  | 3.00 m - 3.70 m | 39.5 | 19.9 | 86.7  |
| S-21  | 2.00 m - 2.60 m | 48.4 | 22.3 | 33.9  |

4.21.

Resultados de triaxiales (U.U.)

También se ejecutó **Ensayo Triaxial Consolidado- No Drenado (Tipo CU)**, con el objetivo de determinar el ángulo de fricción y la cohesión de la arcilla en condiciones no drenadas y consolidada, además de condiciones de humedad, para con ello determinar capacidad de carga del suelo tanto para situaciones de esfuerzos efectivos y totales. En la Tabla 4.22 se muestran los valores obtenidos.

Tabla 4.22. Resultados de triaxiales (C.U.)

| Sondeo No. | Profundidad (m) | Humedad Inicial (%) | Ángulo de fricción (grados) |          | Cohesión del suelo (kPa) |          |
|------------|-----------------|---------------------|-----------------------------|----------|--------------------------|----------|
|            |                 |                     | Total                       | Efectiva | Total                    | Efectiva |
| S-4        | 3.00 m - 3.70 m | 31.6                | 6.4                         | 7.3      | 62.9                     | 64.4     |
| S-12C      | 2.00 m - 2.50 m | 24.7                | 18.4                        | 25.6     | 47.8                     | 45.6     |
| S-21A      | 2.00 m - 2.70 m | 43.4                | 26.0                        | 30.5     | 121.3                    | 125.6    |
| PCA-6      | 4.00 m - 4.70 m | 43.3                | 14.5                        | 16.5     | 109.6                    | 108.3    |
| S-6C       | 4.90 m - 5.60 m | 43.7                | 16.7                        | 19.6     | 92.8                     | 86.8     |
| S-3C       | 4.00 m - 4.70 m | 46.8                | 18.1                        | 22.0     | 69.2                     | 65.3     |
| S-8        | 4.00 m - 4.70 m | 19.3                | 27.1                        | 30.9     | 57.9                     | 58.9     |

## Coeficiente Volumétrico de Abundamiento

El Coeficiente Volumétrico de Abundamiento es un parámetro que representa el incremento relativo en el volumen de un material excavado respecto a su volumen in situ, debido a la pérdida de compacidad durante la excavación. Se expresa como la relación entre el volumen del material suelto (después de excavar) y el volumen del material en su estado original en el sitio. En la Tabla 4.23 se muestran los valores obtenidos en los Sondeos de Penetración Estándar y nos permitirá contar con información para la evaluación de carga y acarreo de los materiales producto de la excavación para su retiro fuera de la obra.

Tabla 4.23. Resultado de Coeficiente Volumétrico de Abundamiento en sondeos SPT

| SONDEOS SPT |                 |          |                                                      |                                                     |                                             |
|-------------|-----------------|----------|------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|---------------------------------------------|
| Sondeo No.  | Profundidad (m) | S.U.C.S. | Masa Volumétrica estado natural (kg/m <sup>3</sup> ) | Masa Volumétrica estado suelto (kg/m <sup>3</sup> ) | Coeficiente volumétrico de abundancia (CVA) |
| S-1A        | 0.90 a 3.00     | CL       | 1627                                                 | 1262                                                | 1.29                                        |
| S-1         | 0.80 a 2.90     | CH       | 1781                                                 | 1082                                                | 1.65                                        |
| S-01C       | 0.70 a 4.00     | CL       | 1779                                                 | 1352                                                | 1.32                                        |
| S-2         | 2.00 a 5.20     | CH       | 1780                                                 | 1217                                                | 1.46                                        |
| S-3C        | 1.20 a 4.00     | CH       | 1708                                                 | 1080                                                | 1.58                                        |
| S-4         | 0.90 a 3.10     | SC       | 1592                                                 | 1216                                                | 1.31                                        |
| S-4C        | 2.00 a 3.00     | CH       | 1792                                                 | 1097                                                | 1.63                                        |
| S-5         | 2.00 a 3.00     | CH       | 1780                                                 | 1165                                                | 1.53                                        |
| S-5C        | 2.10 a 3.20     | CL       | 1772                                                 | 1271                                                | 1.39                                        |
| S-6         | 1.00 a 6.00     | CH       | 1781                                                 | 1092                                                | 1.63                                        |
| S-7         | 2.10 a 3.15     | MH       | 1921                                                 | 1301                                                | 1.48                                        |
| S-8         | 2.10 a 7.00     | CH       | 1778                                                 | 1184                                                | 1.50                                        |
| S-9         | 0.80 a 3.00     | SM       | 1683                                                 | 1374                                                | 1.22                                        |
| S-10        | 1.60 a 3.90     | SM       | 1524                                                 | 1234                                                | 1.24                                        |
| S-11        | 2.20 a 5.90     | CH       | 1726                                                 | 1105                                                | 1.56                                        |
| S-12        | 1.45 a 2.60     | CH       | 1700                                                 | 1095                                                | 1.55                                        |
| S-6C        | 1.80 a 2.50     | CH       | 1529                                                 | 1062                                                | 1.44                                        |
| S-13        | 1.50 a 3.90     | GM       | 1723                                                 | 1274                                                | 1.35                                        |
| S-14        | 0.90 a 5.80     | CH       | 1893                                                 | 1183                                                | 1.60                                        |
| S-15        | 0.45 a 3.45     | SC       | 1316                                                 | 1079                                                | 1.22                                        |
| S-15A       | 2.00 a 2.60     | SC       | 1464                                                 | 1206                                                | 1.21                                        |
| S-8C        | 1.20 a 3.45     | GC       | 1316                                                 | 1116                                                | 1.18                                        |
| S-2N        | 1.20 a 3.00     | CL       | 1323                                                 | 1007                                                | 1.31                                        |
| S-16A       | 1.45 a 3.00     | SM       | 1404                                                 | 1154                                                | 1.22                                        |
| S-17        | 0.45 a 2.45     | CH       | 1703                                                 | 1074                                                | 1.59                                        |
| S-10C       | 1.90 a 3.00     | ML       | 1207                                                 | 1004                                                | 1.20                                        |
| S-19        | 2.00 a 4.00     | CL       | 1892                                                 | 1322                                                | 1.43                                        |
| S-12C       | 2.60 a 3.70     | SM       | 1195                                                 | 1002                                                | 1.19                                        |
| S-13C       | 2.00 a 6.00     | GM       | 961                                                  | 836                                                 | 1.15                                        |
| S-21        | 2.00 a 4.00     | SM       | 1292                                                 | 1002                                                | 1.29                                        |
| S-21A       | 3.00 a 4.00     | ML       | 1378                                                 | 1079                                                | 1.28                                        |

En la Tabla 4.24 se muestran los valores obtenidos en Pozos a cielo abierto. En este caso cabe mencionar que en los sondeos donde no se determinó el Coeficiente volumétrico de abundancia (CVA), se identificó la presencia superficial de roca, ya sea en forma de manto, boleos o bien material intemperizado. Debido a la naturaleza de estos materiales, no fue posible calcular el CVA, ya que su comportamiento volumétrico durante la excavación no se ajusta a los métodos convencionales para suelos.

Tabla 4.24. Resultado de Coeficiente Volumétrico de Abundamiento en sondeos PCA.

| SONDEOS PCA |                 |          |                                                      |                                                     |                                             |
|-------------|-----------------|----------|------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|---------------------------------------------|
| Sondeo No.  | Profundidad (m) | S.U.C.S. | Masa Volumétrica estado natural (kg/m <sup>3</sup> ) | Masa Volumétrica estado suelto (kg/m <sup>3</sup> ) | Coeficiente volumétrico de abundancia (CVA) |
| PCA-1A-1    | 1.50 a 2.80     | CH       | 1649                                                 | 1082                                                | 1.52                                        |
| PCA-1A-2    | 1.80 a 3.90     | MH       | 1654                                                 | 1061                                                | 1.56                                        |
| PCA-2C      | 3.90 a 5.00     | CH       | 1716                                                 | 1122                                                | 1.53                                        |
| PCA-5C-1    | 1.80 a 5.00     | CH       | 1810                                                 | 1082                                                | 1.67                                        |
| PCA-5C-2    | 0.20 a 5.00     | CH       | 1810                                                 | 1082                                                | 1.67                                        |
| PCA-6       | 0.20 a 5.00     | CL       | 1765                                                 | 1219                                                | 1.45                                        |
| PCA-7       | 0.20 a 2.20     | GC       | 1570                                                 | 1238                                                | 1.27                                        |
| PCA-8       | 2.80 a 4.60     | CL       | 1602                                                 | 1149                                                | 1.39                                        |
| PCA-9       | 1.80 a 5.00     | CL       | 1598                                                 | 1156                                                | 1.38                                        |
| PCA-10-1    | 1.60 a 4.40     | CL       | 1520                                                 | 1120                                                | 1.36                                        |
| PCA-10-2    | 0.20 a 1.90     | CL-ML    | 1474                                                 | 1144                                                | 1.29                                        |
| PCA-11      | 3.60 a 5.00     | CH       | 1734                                                 | 1165                                                | 1.49                                        |
| PCA-14-1    | 1.80 a 5.00     | CH       | 1719                                                 | 1107                                                | 1.55                                        |
| PCA-14-2    | 0.40 a 2.10     | CL       | 1509                                                 | 1191                                                | 1.27                                        |
| PCA-15A     | 2.00 a 5.00     | SC       | 1574                                                 | 1286                                                | 1.22                                        |
| PCA-8C-1    | 1.80 a 3.90     | SM       | 1378                                                 | 1161                                                | 1.19                                        |
| PCA-2N-1    | 1.50 a 4.40     | ML       | 1408                                                 | 1174                                                | 1.20                                        |
| PCA-2N-2    | 2.40 a 5.00     | CH       | 1594                                                 | 1067                                                | 1.49                                        |
| PCA-16      | 1.30 a 2.00     | CL       | 1432                                                 | 1139                                                | 1.26                                        |
| PCA-17      | 1.90 a 3.20     | SM       | 1111                                                 | 872                                                 | 1.27                                        |
| PCA-18      | 2.40 a 5.00     | MH       | 1369                                                 | 980                                                 | 1.40                                        |
| PCA-19      | 0.00 a 2.40     | GC       | 1571                                                 | 1315                                                | 1.19                                        |
| PCA-21      | 1.90 a 2.40     | SM       | 1367                                                 | 1165                                                | 1.17                                        |
| PCA-22      | 2.40 a 5.04     | SM       | 1604                                                 | 1380                                                | 1.16                                        |

#### 4.4.7 Recomendaciones y Procedimiento Constructivo Línea de Conducción

De las exploraciones y ensayos de laboratorio se concluye que el subsuelo a lo largo de la línea de conducción está compuesto por materiales mixtos y compresibles como arcillas y limos elásticos de alta a muy alta compresibilidad, materiales inertes, como arenas y gravas, y finalmente manto de roca o boleas de roca, detectados en número significativo de sondeos realizados (45%) y a profundidad variable, entre 1.02 m y 8.05 m. Asimismo, se detectó agua en el 20% de los sondeos, especialmente en zonas con depresiones topográficas entre elevaciones colinares (valles) o zonas lacustres donde se acumula el agua, encontrando este nivel a profundidad variable, 2.50 m y 6.30 m.

Respecto a las propiedades mecánicas del subsuelo, se establece que, con base en la excavación destinada a alojar la tubería a profundidad entre 3.80 m y 5.65 m, se atraviesan los estratos blandos o sueltos presentes en algunos sondeos. Por consiguiente, el problema principal no será de capacidad de carga del terreno, sino de deformaciones que, con cambios en el contenido de agua del subsuelo, se podrán tener variaciones volumétricas, esto es movimientos por expansión-contracción y por ende asentamientos. Particularmente, en la zona del sondeo S-14 (Kilómetro 16+396), se identifica un subsuelo altamente desfavorable, caracterizado por la presencia de estratos blandos y compresibles hasta profundidad de 8 metros, además de presencia de agua, lo que hace una zona de riesgo, por lo que requiere mejoramiento especializado y profundo en esta zona.

En la figura 4.16 se muestra una sección típica para el manejo de los taludes y dimensiones para la instalación de la tubería propuesta para el Acueducto Sustituto. Para alojar la estructura se determina un ancho de 3.30 metros y por lo menos 3 metros de altura sobre una plantilla mínima de 0.30 mts. Del nivel del terreno natural al nivel del acostillado, se deberá considerar un talud de 45 grados que tendrá profundidades variables entre los 0.50 mts y hasta 2.65 mts de altura determinado tanto por condiciones de suelo como de los niveles de desplante del proyecto.

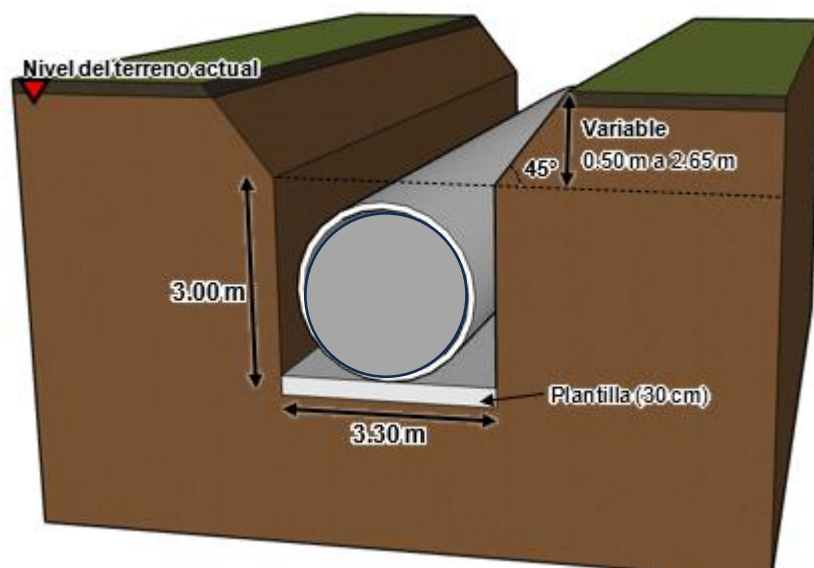


Figura 4.16 Sección Tipo para alojar la tubería



Para el desplante de la tubería, debido a que se tienen diferentes condiciones a lo largo de los cuarenta y dos kilómetros se definieron los procedimientos a seguir según los materiales de desplante que podrían ubicarse. Se detectaron 4 posibles escenarios.

- **Tipo A: Desplante sobre materiales inertes (arenas o limos).**

*i. La profundidad mínima* para llevar a cabo el **desplante** del acueducto, será a **3.80 m**, respecto al nivel de terreno actual (o brocal de sondeos). Esta profundidad podrá aumentar marginalmente (30 cm) en ciertas zonas por presencia de estratos sueltos, por lo que se deberá estar atento durante el proceso de excavación, asegurando desplante sobre suelo competente (firme, no suelto). Una vez llegada la excavación al nivel de desplante, **colocar plantilla de 30 cm de espesor** con material de banco inerte (grava o bien arena limosa = tepetate, a checar con proyectista) o bien material producto de la excavación (arenas inertes). Compactar al 95% de su masa volumétrica seca máxima (MVSM) y humedad óptima.

- **Tipo B: Desplante sobre boleos o manto de roca.**

*i. La profundidad mínima* para llevar a cabo el **desplante** del acueducto, será a **3.80 m**, respecto al nivel de terreno actual (o brocal de sondeos), esta profundidad podrá aumentar en ciertas zonas, a no más de 5.65 m, según indicaciones en croquis), hasta asegurarse el llegar a la roca (dominio de boleos o bien manto).

Una vez llegada la excavación a la roca, **retirar el material arcilloso, boleos sueltos y colocar lechada de calhidra** sobre toda la superficie de desplante, para aglutinar boleos/manto de roca y estabilizar cualquier material compresible residual.

Finalmente **colocar plantilla de 30 cm de espesor** con material de banco y compactar al 95% de su masa volumétrica seca máxima (MVSM) y humedad óptima.

- **Tipo C: Desplante sobre materiales compresibles y/o con presencia de agua.**

*i. La profundidad mínima* para llevar a cabo el **desplante** del acueducto, será a **3.50 m**, respecto al nivel de terreno actual (o brocal de sondeos), esta profundidad podrá aumentar en ciertas zonas por presencia de estratos blandos (a no más de 5.95 m, según indicaciones en croquis), aunque será necesario realizar mejoramiento del subsuelo por presencia de materiales compresibles, blandos y/o presencia de agua. Seguir las indicaciones de enseguida:

- a) Excavar 70 cm adicionales al desplante (ver profundidad en tabla por zona/sondeos), debiendo asegurar el quedar debajo de estratos blandos (suelo competente).
- b) Conformar capa estabilizadora/rompedora de 40 cm de espesor, empleando material grueso, que podrá ser cascajo de piedra de buena calidad y limpio o bien grava de basalto de calidad, con tamaños graduados de 5" a 1/2", sin finos ni arena (máximo 10%), debiendo acomodar el material sin dejar huecos, evitando fracturar o triturar los gruesos.
- c) Colocar geotextil para evitar la contaminación de la capa estabilizadora/rompedora de gruesos con finos de la capa tipo base o plantilla.
- d) Colocar capa de base cementada (plantilla) de 30 cm de espesor, mediante material de banco inerte (arena limosa = tepetate), mezclado con cemento gris a razón de 50 kg/m<sup>3</sup>, capa que servirá para desplante de tubo y como sello por presencia de agua.

- **Tipo D: Desplante sobre materiales compresibles, blandos hasta profundidad importante y con presencia de agua.**

*i. La profundidad mínima* para llevar a cabo el **desplante** del acueducto, será a **3.50 m**, respecto al nivel de terreno actual (o brocal de sondeos), aunque será necesario realizar mejoramiento del subsuelo por presencia de materiales compresibles y blandos hasta profundidad significativa (>8 m), así como a la existencia de agua, condiciones que toman inviable una excavación considerable por su profundidad y riesgos asociados.

Se propone instalar inclusiones rígidas a lo largo y ancho de la excavación (desplante de tubería del acueducto), a checar con especialista en este tipo de trabajos (mejoramiento de suelos). El mejoramiento del suelo mediante inclusiones rígidas se logra al instalar columnas de material de alta rigidez dentro del terreno natural, sin que estas estén directamente ligadas a la cimentación o estructura (acueducto). Las inclusiones funcionan como elementos que redistribuyen las descargas transmitidas desde la estructura (tubo) hacia estratos más profundos y competentes, mejorando la capacidad portante del sistema y en especial controlando asentamientos. A continuación, se describen las especificaciones:

- e) **Proceso de instalación:** Posterior a la excavación de cepa hasta el nivel de desplante del acueducto y adicionalmente 0.80 m para la conformación de capa de transferencia de carga (0.50 m) y de transición o plantilla (0.30 m), llegando a profundidad de 4.30 m (respecto a nivel actual de sondeo), se realizará perforación para inclusiones rígidas con diámetro ( $\emptyset$ ) de 0.30 m, longitud de 4.70 m (llegando a 9.00 m respecto a nivel actual de terreno, suelo competente) y separadas a cada 0.90 m (tres veces el diámetro).
- f) **Material para las inclusiones:** La resistencia del material utilizado para las inclusiones rígidas dependerá de los requisitos del proyecto y las cargas aplicadas. Para garantizar un buen desempeño, se recomienda resistencia mínima a la compresión simple ( $f_c$ ) de 200 kg/cm<sup>2</sup> (20 MPa), sin refuerzo de acero.
- g) **Capa de transferencia de carga:** El espesor de esta capa será de 50 cm. Los agregados gruesos que la conformarán la capa deberán tener un tamaño entre 50 mm y 75 mm, estar bien graduados y ser colocados (compactado) de manera que se eviten huecos o grava suelta, minimizando así las deformaciones bajo la carga.
- h) **Geotextil:** Posterior a la conformación de la capa de transferencia de carga, se deberá colocar una membrana geotextil para evitar la contaminación con material fino procedente de la capa superior (de transición).
- i) **Capa de transición:** Se deberá conformar capa de transición con espesor de 30 cm, utilizando material del lugar o arena inerte, mezclado con cemento gris en proporción de 50 kg/m<sup>3</sup>. Esta capa deberá compactarse al 100% de la masa volumétrica seca máxima (MVSM) y humedad óptima, capa que servirá para desplante del acueducto.

Este sistema de mejoramiento (inclusiones rígidas) permite que el suelo entre las inclusiones también participe en la transferencia de carga, creando un efecto combinado que optimiza el comportamiento del conjunto. De esta forma, se logra una solución eficiente y económica para terrenos con suelos blandos. Se deberá revisar con empresa especialista en este tipo de trabajos. El procedimiento se puede visualizar en la Figura 4.17

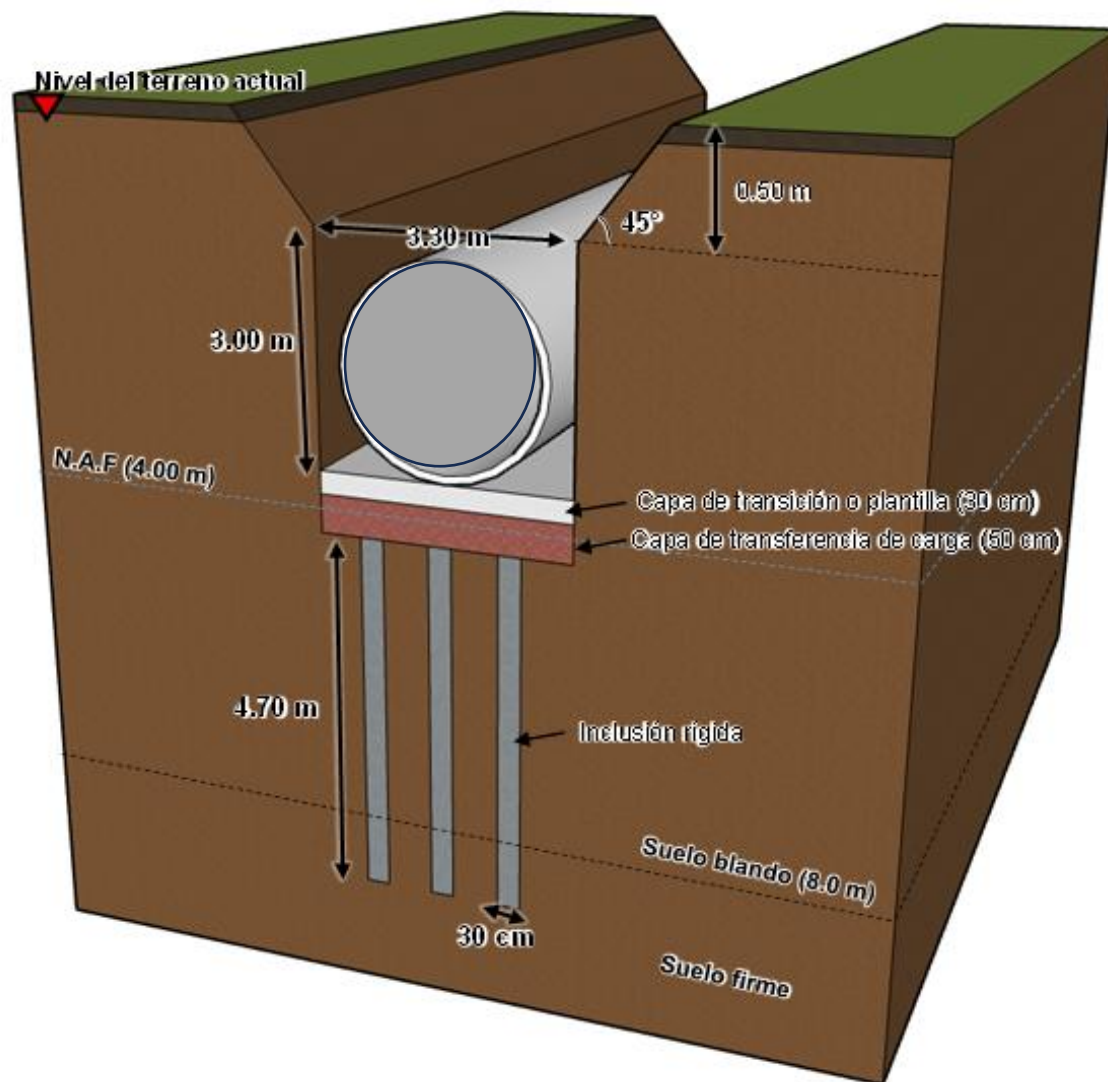


Figura 4.17 Mejoramiento de Suelo mediante inclusiones rígidas

En la Tabla 4.25 se muestra el kilometraje con los datos respectivos de los sondeos y se refiere el tipo de mejoramiento que deberá usarse con la profundidad de excavación recomendada.

Tabla 4.25 Ubicación por Tipo de Mejoramiento a lo largo del Acueducto.

| Sondeo No. | Cad.   | Tipo de mejoramiento / desplante | Excavación variable | Excavación desplante * | Excavación por mejoramiento | Prof. total Excavación |
|------------|--------|----------------------------------|---------------------|------------------------|-----------------------------|------------------------|
| S-1A       | --     | C (compresible)                  | 0.50 m              | 3.50 m                 | 0.70 m                      | 4.20 m                 |
| S-1        | 2+518  | C (compresible)                  | 0.50 m              | 3.50 m                 | 0.70 m                      | 4.20 m                 |
| S-1C       | 2+927  | C (compresible)                  | 0.50 m              | 3.50 m                 | 0.70 m                      | 4.20 m                 |
| S-2        | 3+071  | B (boleos)                       | 1.90 m              | 5.20 m                 | 0.00 m                      | 5.20 m                 |
| S-1N       | --     | B (boleos)                       | 0.50 m              | 3.80 m                 | 0.00 m                      | 3.80 m                 |
| S-2C       | 4+282  | B (boleos)                       | 0.50 m              | 3.80 m                 | 0.00 m                      | 3.80 m                 |
| S-3C       | 5+463  | A (inerte)                       | 0.80 m              | 4.10 m                 | 0.00 m                      | 4.10 m                 |
| S-4        | 5+788  | C (agua y compresible)           | 0.50 m              | 3.50 m                 | 0.70 m                      | 4.20 m                 |
| S-4C       | 5+937  | C (agua, blando y compresible)   | 1.10 m              | 4.10 m                 | 0.70 m                      | 4.80 m                 |
| S-5        | 6+509  | C (agua, blando y compresible)   | 2.10 m              | 5.10 m                 | 0.70 m                      | 5.80 m                 |
| S-5C       | 7+395  | A (inerte)                       | 0.50 m              | 3.80 m                 | 0.00 m                      | 3.80 m                 |
| S-6        | 8+062  | C (compresible)                  | 0.50 m              | 3.50 m                 | 0.70 m                      | 4.20 m                 |
| S-7        | 8+434  | A (inerte)                       | 0.50 m              | 3.80 m                 | 0.00 m                      | 3.80 m                 |
| S-8        | 9+201  | C (compresible)                  | 0.50 m              | 3.50 m                 | 0.70 m                      | 4.20 m                 |
| S-9        | 10+027 | C (compresible)                  | 0.50 m              | 3.50 m                 | 0.70 m                      | 4.20 m                 |
| S-10       | 10+879 | C (agua y compresible)           | 0.50 m              | 3.50 m                 | 0.70 m                      | 4.20 m                 |
| S-11       | 10+879 | C (compresible)                  | 0.50 m              | 3.50 m                 | 0.70 m                      | 4.20 m                 |
| S-12       | 11+330 | C (compresible)                  | 0.50 m              | 3.50 m                 | 0.70 m                      | 4.20 m                 |
| S-6C       | 12+167 | C (compresible)                  | 0.50 m              | 3.50 m                 | 0.70 m                      | 4.20 m                 |
| S-13       | 14+081 | C (agua)                         | 0.50 m              | 3.50 m                 | 0.70 m                      | 4.20 m                 |
| S-14       | 16+396 | D (agua, blando y compresible)   | 0.50 m              | 3.50 m                 | 0.80 m                      | 4.30 m**               |
| S-15       | 19+709 | A (inerte)                       | 0.50 m              | 3.80 m                 | 0.00 m                      | 3.80 m                 |
| S-7C       | 20+297 | B (boleos)                       | 0.50 m              | 3.80 m                 | 0.00 m                      | 3.80 m                 |
| S-16       | 21+056 | B (boleos)                       | 0.50 m              | 3.80 m                 | 0.00 m                      | 3.80 m                 |
| S-15A      | 21+680 | A (inerte)                       | 0.50 m              | 3.80 m                 | 0.00 m                      | 3.80 m                 |
| S-8C       | 22+499 | A (inerte)                       | 0.50 m              | 3.80 m                 | 0.00 m                      | 3.80 m                 |
| S-2N       | --     | B (boleos)                       | 1.40 m              | 4.70 m                 | 0.00 m                      | 4.70 m                 |
| S-16A      | 23+829 | C (compresible)                  | 0.50 m              | 3.50 m                 | 0.70 m                      | 4.20 m                 |
| S-17       | 24+168 | C (compresible)                  | 0.50 m              | 3.50 m                 | 0.70 m                      | 4.20 m                 |
| S-18       | 26+478 | B (boleos)                       | 0.50 m              | 3.80 m                 | 0.00 m                      | 3.80 m                 |
| S-9C       | 27+846 | B (boleos)                       | 0.50 m              | 3.80 m                 | 0.00 m                      | 3.80 m                 |
| S-10C      | 28+684 | C (compresible)                  | 0.50 m              | 3.50 m                 | 0.70 m                      | 4.20 m                 |
| S-19       | 29+535 | B (boleos)                       | 1.15 m              | 4.45 m                 | 0.00 m                      | 4.45 m                 |
| S-11C      | 29+830 | B (boleos)                       | 0.50 m              | 3.80 m                 | 0.00 m                      | 3.80 m                 |
| S-19A      | 31+300 | B (boleos)                       | 0.50 m              | 3.80 m                 | 0.00 m                      | 3.80 m                 |
| S-12C      | 31+992 | A (inerte)                       | 0.50 m              | 3.80 m                 | 0.00 m                      | 3.80 m                 |
| S-20       | 32+980 | B (boleos)                       | 0.50 m              | 3.80 m                 | 0.00 m                      | 3.80 m                 |
| S-13C      | 33+414 | A (inerte)                       | 0.50 m              | 3.80 m                 | 0.00 m                      | 3.80 m                 |
| S-21       | 35+083 | C (compresible y agua)           | 0.50 m              | 3.50 m                 | 0.70 m                      | 4.20 m                 |
| S-21A      | --     | C (compresible)                  | 0.50 m              | 3.50 m                 | 0.70 m                      | 4.20 m                 |

\* Excavación de desplante incluye excavación variable (superficial) + Excavación para alojar tubería.

\*\* Falta considerar excavación de inclusiones rígidas (zona crítica, S-14)



Las recomendaciones para el proceso constructivo del Acueducto se presentan a continuación.

**i. Las excavaciones** podrán realizarse mediante taludes verticales, sin apuntalamiento, siempre y cuando no rebasen los 2.00 m de profundidad. Procurar que las excavaciones no estén abiertas más de 5 días para evitar cambios en su humedad o contenido de agua del material de las paredes de la excavación y en consecuencia desprendimientos de los taludes. El ángulo del talud para la excavación será variable, recomendando 1:1 (45°), sin embargo, si se está excavando en zonas con roca desde la superficie (boleos/manto) se podrá realizar excavación vertical (90°).

**ii. El relleno** para instalaciones, cimentación (en zona de atraques) o sobre el tubo, debe hacerse con material de banco inerte (grava o arena limosa = tepetate), o bien material producto de excavación en zonas con arenas inertes, aunque deberá comprobarse que este material cumple las características para ser empleado como relleno. Compactar en capas de 10 a 15 cm de espesor, previamente humedecido a fin de alcanzar el 90% de su masa volumétrica seca máxima (MVSM) y 95% cuando vaya a recibir cargas. El equipo para compactar deberá ser mecánico, tipo rodillo vibratorio de buena capacidad.

**iii. Las instalaciones** cuidar que sean realizadas correctamente, observando la unión entre los tubos (hermética) y el que queden asentadas sobre capa de material de banco inerte compactado de al menos 30 cm de espesor (ya mencionado en las recomendaciones), además de acostillar alrededor del tubo. Probar que no haya fugas (antes de rellenar o tapar) para evitar erosión con los consecuentes problemas de asentamientos. Nunca desplantar directamente sobre la roca, debiendo colocar una plantilla, como se ha indicado.

**iv. Generales** cuidar el perímetro de la línea de conducción para evitar filtración de agua al subsuelo, recomendando dar desnivel al terreno, para captar y desalojar el agua proveniente de escurrimientos superficiales, evitando con ello cambios en el contenido de agua del subsuelo.

**v. Normas y referencias** utilizadas en esta exploración geotécnica, las cuales han sido fundamentales para garantizar la precisión y confiabilidad de los resultados obtenidos. Estas normas abarcan aspectos relacionados con procedimientos de muestro, pruebas en campo y pruebas de laboratorio.

- Ensayo de Penetración Estándar (SPT): ASTM D 1586 y D 6066.
- Prueba Pozo a Cielo Abierto (PCA): NMX-C-430.
- Determinación del contenido de agua mediante horno: NMX-C-475.
- Determinación de límites de consistencia de suelos: NMX-C-493.
- Determinación de la composición granular de los materiales térreos: NMX-C-496.

#### 4.4.8 Bancos de Préstamo

Este estudio tiene como objetivo recopilar información relevante sobre las propiedades físicas (calidades) de los bancos de materiales ubicados en las proximidades de la futura línea de conducción “Acueducto Chapala - Guadalajara”, con miras a evaluar su viabilidad para su empleo en la construcción de la obra. Esta caracterización permitirá optimizar la selección de materiales locales, reduciendo costos logísticos y asegurando el cumplimiento de las especificaciones técnicas requeridas para la estabilidad y durabilidad de la infraestructura.

Se localizaron cinco distintos bancos en operación, realizando el muestreo alterado de los materiales ya explotados para su uso y venta en cada banco. Estas muestras se destinaron a la realización de ensayos de laboratorio para la clasificación del suelo y determinación de sus propiedades índice generales (granulometría, límites de Atterberg y masa volumétrica seca, masa volumétrica seca compacta y desgaste los Ángeles).

Los bancos de materiales muestreados se localizan principalmente en la zona sur del proyecto de la línea de conducción, específicamente entre los cadenamientos 0+000 y 17+000 y todos ellos produciendo materiales de trituración (gravas y arenas).

En la Tabla 4.26 se muestran los datos de las capacidades de producción, información de contacto y las coordenadas UTM de su ubicación.

| BANCO DE MATERIAL | COORD ESTE (X) | COORD NORTE (Y) | CONTACTO             | TELÉFONO     | PRODUCCIÓN                                                                                                                                                           | INFORMACIÓN ADICIONAL                 |
|-------------------|----------------|-----------------|----------------------|--------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|
| MENCAR CHAPALA    | 690,471        | 2'249,375       | Alejandro Cortés     | 33 2144 3746 | - Producción de 800 m <sup>3</sup> por turno.<br>- Sin cálculo de reserva explotable.                                                                                | Potencial de gran volumen explotable. |
| LOS ZALATES       | 691,890        | 2'252,660       | Ing. Juan J. Amezcua | 33 3198 6770 | - Producción de 300 m <sup>3</sup> por turno.<br>- Sin cálculo de volumetría del banco.                                                                              | --                                    |
| GRAVASE           | 682,172        | 2'255,453       | --                   | 33 3201 3676 | - Producción de 700 m <sup>3</sup> por turno.<br>- Reserva explotable confidencial.                                                                                  | Cuenta con banco de tiro              |
| TRITURADOS GASA   | 682,795        | 2'255,804       | --                   | 33 5127 0464 | - Materiales triturados, especialmente filtro de grava de 3" a 8"<br>- Producción diaria: 600 m <sup>3</sup><br>- Reserva explotable: 1.5 millones de m <sup>3</sup> | Tiene permisos vigentes               |
| AGREGADOS G Y B   | 683,815        | 2'256,421       | --                   | 33 3201 5486 | - Grava de ¾" - Grava de 3/8" (Filtro)<br>- Producción de 500 m <sup>3</sup> por turno.                                                                              | --                                    |

La ubicación de los bancos y su distancia respectiva al trazo proyectado de la línea de conducción es información clave para evaluar la viabilidad logística y económica de su uso. El Banco Mencar se ubica a 3.84 kilómetros de distancia sobre camino de terracería al Km 3+480 del Acueducto en Ixtlahuacán de los Membrillos. El Banco Los Zalates se ubica a 1.95 kilómetros de distancia sobre camino de terracería al Km 5+373 del Acueducto en Santa Cruz de la Soledad.

Desde el Banco Gravase se puede acceder en dos puntos distintos al Acueducto, ambos por caminos de terracerías. El primero acceso se ubica a 2.73 kilómetros de distancia al Km 13+851 del Acueducto y el segundo a 3.69 kilómetros de distancia al Km 16+656. Este banco se ubica en el poblado de San Juan Evangelista. El Banco triturados Gasa se accede sobre el mismo camino de terracería, pero con menos distancia al mismo punto anterior, de aproximadamente 2.75 kilómetros. Este banco se localiza en Ixtlahuacán de los Membrillos.

El banco más cercano al acueducto es el banco de agregados GYB que se localiza en la avenida Acueducto Norte 250 en Ixtlahuacán de los Membrillos en el Km 14+975 del Acueducto. La ubicación geográfica de los bancos se puede apreciar en la Lámina 4.8 y las distancias al Acueducto en la Tabla 4.27



| BANCO DE MATERIAL | DISTANCIA A LÍNEA DE CONDUCCIÓN | CADENAMIENTO APROXIMADO A LÍNEA |
|-------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| MENCAR CHAPALA    | 3.84 km                         | 3+480                           |
| LOS ZALATES       | 1.95 km                         | 5+373                           |
| GRAVASE           | 2.73 km (al sur)                | 13+851                          |
|                   | 3.69 km (al norte)              | 16+656                          |
| TRITURADOS GASA   | 2.75 km                         | 16+656                          |
| AGREGADOS G Y B   | 0.00 km                         | 14+975                          |

Con el objeto de definir con suficiente aproximación el valor y variación de las propiedades físicas de los materiales, se muestrearon 10 materiales procedentes de los cinco bancos visitados, permitiendo una evaluación representativa de las opciones disponibles para su potencial uso en la construcción de la línea de conducción. Las muestras fueron tomadas del material ya explotado según la norma de muestreo representativo, realizándose en laboratorio los ensayos que consistieron en granulometría (tamaños de partículas y límites de consistencia para determinar su clasificación SUCS (sistema unificado de clasificación de suelos), masa volumétrica seca suelta y masa volumétrica seca compacta.

Los resultados obtenidos de los ensayos en los bancos se muestran en la Tabla 4.28.

| BANCO                  | DESCRIPCIÓN                                | SUCS  | % FINOS | % ARENA | % GRUESOS | L.L. (%) | I.P. (%) | C.L. (%) | MVSS (kg/m³) | MVSC (kg/m³) |
|------------------------|--------------------------------------------|-------|---------|---------|-----------|----------|----------|----------|--------------|--------------|
| <b>TRITURADOS GASA</b> | Grava de 1 ½" a ¾"                         | GW    | 0.2     | 0.0     | 99.8      | --       | --       | --       | 1,262        | 1,398        |
|                        | Grava de ¾" a 3/8"                         | GP    | 0.9     | 3.6     | 95.5      | --       | --       | --       | 1,274        | 1,362        |
|                        | Grava de ¾" a 3/16"                        | GP    | 0.5     | 0.2     | 99.4      | --       | --       | --       | 1,297        | 1,376        |
|                        | Arena de 3/16" a 0" (arena de trituración) | SM    | 12.4    | 87.6    | 0.0       | --       | --       | --       | 1,420        | 1,590        |
| <b>AGREGADOS G Y B</b> | Grava de 1 ½"                              | GP    | 0.0     | 0.1     | 99.9      | --       | --       | --       | 1,347        | 1,502        |
|                        | Arena de trituración                       | SM    | 14.7    | 85.3    | 0.0       | --       | --       | --       | 1,474        | 1,655        |
| <b>ZALATES</b>         | Grava de 2 ½"                              | GC    | 15.9    | 7.2     | 76.9      | 41.48    | 16.78    | 3.80     | 1,380        | 1,492        |
|                        | Roca basáltica de 2" a 6"                  | --    | --      | --      | --        | --       | --       | --       | --           | --           |
| <b>GRAVASE</b>         | Grava de ¾"                                | GP    | 0.0     | 0.0     | 100.0     | --       | --       | --       | 1,350        | 1,518        |
| <b>MENCAR CHAPALA</b>  | Grava de 1" a finos                        | GW-GM | 7.8     | 43.9    | 48.3      | 24.42    | --       | 0.00     | 1,484        | 1,622        |

L.L. = Límite líquido

I.P. = Índice plástico

C.L. = Contracción lineal

-- = No presenta

MVSS = Masa volumétrica seca suelta MVSC = Masa volumétrica seca compacta

Adicionalmente a los materiales pétreos gruesos (gravas), por tamaños seleccionados, se determina el índice de desgaste "Los Ángeles" mediante el ensayo homónimo (NMX-C-196), que evalúa la resistencia al desgaste y al impacto de los agregados.

La prueba consiste en someter una muestra de grava, cribada por ciertas mallas (tamaños), a 500 revoluciones en un tambor rotatorio con esferas de acero, midiendo posteriormente el porcentaje de material fino generado (pérdida por desgaste).

El desgaste se calcula dividiendo la diferencia entre los pesos iniciales y finales, y el peso inicial, resultado expresado en porcentaje, como se muestra en la siguiente formula:

$$\% \text{ Desgaste} = \frac{\text{Diferencia}}{\text{Peso Inicial}} \times 100$$



En la Tabla 4.29 se muestran los resultados de las 7 muestras de gravas analizadas indicando el banco de origen.

| BANCO           | DESCRIPCIÓN         | SUCS  | PESO INICIAL (g) | PESO FINAL (g) | DIFERENCIA DE PESO > MALLA No. 12 (g) | DESGASTE (%) |
|-----------------|---------------------|-------|------------------|----------------|---------------------------------------|--------------|
| TRITURADOS GASA | Grava de 1 ½" a ¾"  | GW    | 10,000           | 7,390          | 2,610                                 | 26.10        |
|                 | Grava de ¾" a 3/8"  | GP    | 5,000            | 4,035          | 965                                   | 19.30        |
|                 | Grava de ¾" a 3/16" | GP    | 5,000            | 3,795          | 1,205                                 | 24.10        |
| AGREGADOS G Y B | Grava de 1 ½"       | GP    | 10,000           | 8,005          | 1,995                                 | 19.95        |
| ZALATES         | Grava de 2 ½"       | GC    | 5,000            | 3,330          | 1,670                                 | 33.40        |
| GRAVASE         | Grava de ¾"         | GP    | 5,000            | 4,155          | 845                                   | 16.90        |
| MENCAR CHAPALA  | Grava de 1" a finos | GW-GM | 5,000            | 3,935          | 1,065                                 | 21.30        |

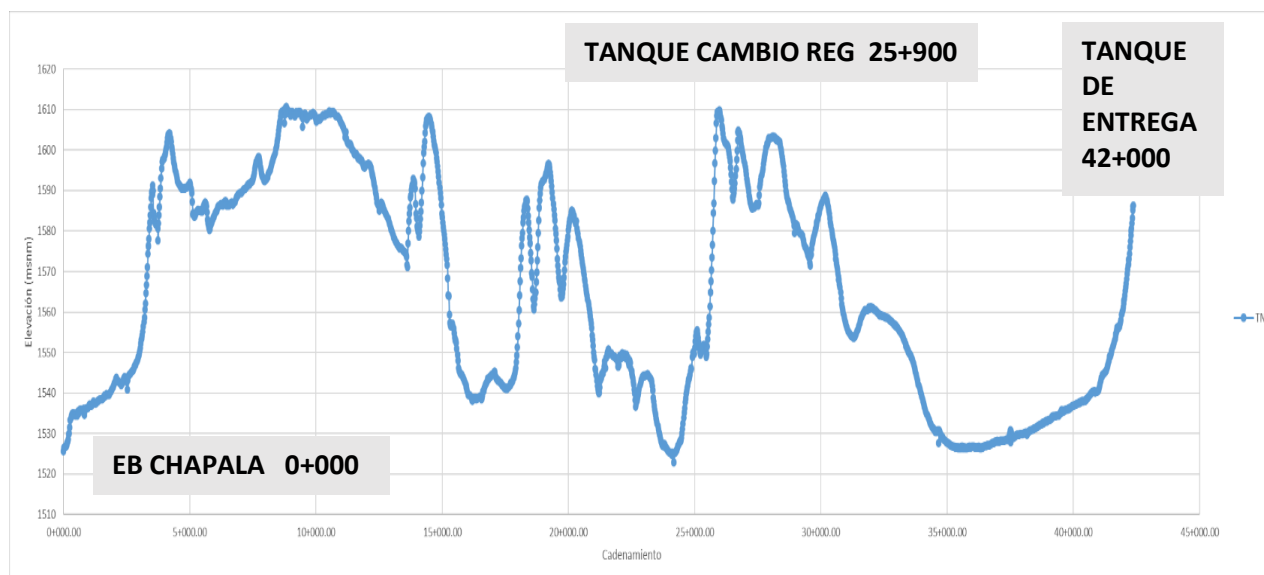
De los ensayos de laboratorio se concluye que el 100% de las muestras analizadas de materiales de bancos **cumplen los requisitos para su empleo en obra**. Su uso específico dependerá de la granulometría (proporción de gruesos y arenas), determinando si se destinan a rellenos, plantilla, acostillado o como filtro de gruesos en las zonas requeridas.

En base a los resultados del ensayo de desgaste los Ángeles realizado en siete muestras de grava provenientes de los cinco bancos de materiales analizados, se obtuvieron porcentajes de **pérdida por desgaste comprendidos entre 16.90% y 33.40%**. Este rango indica una alta resistencia al desgaste y al impacto, ya que valores inferiores al 35% suelen clasificar los agregados como excelentes para su uso en capas de base, subbase o concreto estructural en obras viales y geotécnicas, garantizando durabilidad y minimizando la generación de finos bajo cargas repetidas, por lo tanto, **cumplen para su uso en la obra**.

## 5. Memoria descriptiva y de cálculo

### 5.1. Diseño conceptual

Para efectuar el diseño conceptual del acueducto, una vez determinado el eje de trazo y con la información topográfica se procedió a analizarlo. El perfil se muestra en la Lámina 5.1 y el punto de inicio será la Estación de Bombeo del Acueducto Chapala existente. En la Figura 5.1 se muestra una vista aérea de estación de bombeo actual y se muestra a manera esquemática el área disponible para la nueva infraestructura.



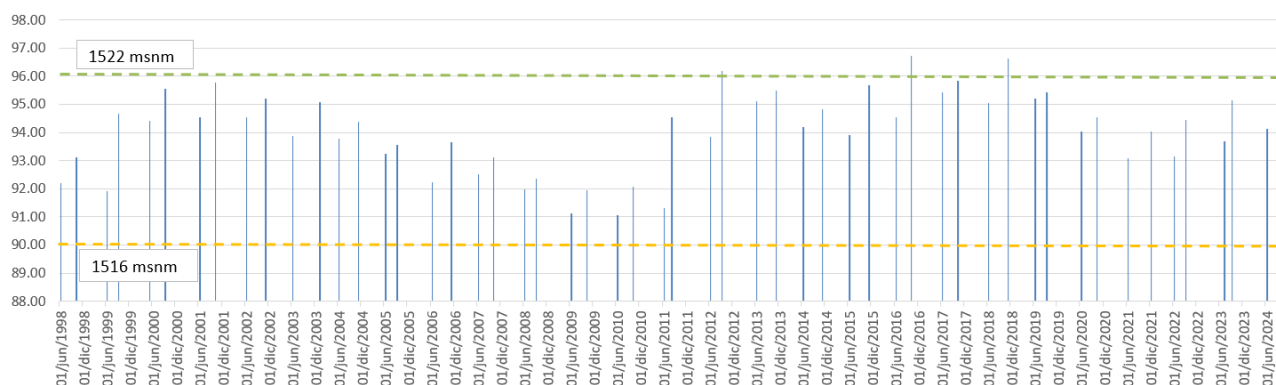
*Lámina 5.1 Perfil topográfico del trazo del acueducto*



*Figura 5.1 Vista Aérea de la estación de bombeo Chapala*

Por otro lado, es importante definir previamente los niveles de operación del Lago de Chapala. Para ello, se evaluaron los datos de los niveles máximos y mínimos registrados en el periodo de 1990 a 2024. En la Figura 5.2 se presentan graficados estos valores.

Los resultados muestran que en dicho periodo solamente en 3 ocasiones se presentan niveles mayores a la cota 96 la cual referida al banco de nivel de INEGI es la cota 1522 msnm. En lo que respecta a los niveles mínimos registrados, sólo en 2 ocasiones se registraron niveles en la cota 91 equivalente a la cota 1517 msnm. De esto se propone, que el rango de operación del bombeo se fije como nivel de aguas máximas ordinarias (NAMO) la cota 1522 msnm y como nivel de aguas mínimas la cota 1516 msnm.



*Figura 5.2 Gráfica de Niveles máximos y mínimos del Lago de Chapala Período 1990-2024 Fuente: Cea Jalisco*

EL acueducto funcionará por bombeo hasta el km 25+900 donde se colocará un tanque de cambio de régimen, ya que es uno de los puntos con mayor elevación más cercano al punto de entrega y a partir del cual se cuenta con pendiente descendente. En la Figura 5.3 se muestra una vista aérea del actual Tanque de Cambio de Régimen. De manera conceptual el nuevo Tanque podría ubicarse en la zona marcada en color amarillo.



*Figura 5.3 Vista Aérea del Tanque de Cambio de Régimen Existente*

A partir del del tanque de cambio de régimen comenzará una línea a gravedad hasta el sitio de descarga, tendrá una longitud de 16.46 km y el desnivel topográfico permite contar con una carga de hasta 25.14 metros.

El sitio de descarga del acueducto será el Tanque de Entrega Cerro del Cuatro, se propone revisar si es factible ampliar la capacidad de almacenamiento previa revisión geotécnica y estructural. La propuesta preliminar se puede visualizar en la Figura 5.3 que muestra una vista aérea del Tanque de Entrega existente y la zona marcada en amarillo como la posible ampliación.



*Figura 5.4 Vista Aérea del Tanque de Entrega y*

## 5.2. Diseño del Acueducto

### 5.2.1. Descripción de las condiciones topográficas

Se realizó un levantamiento topográfico, cuyo reporte se anexa al informe principal del proyecto ejecutivo, dicho levantamiento permitió obtener con detalle la configuración topográfica de la zona y definir un trazo preciso de la línea.

El tramo de acueducto que funcionara como línea de impulsión, tiene una longitud de 25.92 km con un desnivel total de 96.50 metros. Se distinguen varias zonas con configuraciones topográficas particulares: La configuración topográfica en el tramo se describe a continuación:

- Entre el cadenamiento 0+000 al cadenamiento 0+230 existe un desnivel de 5 metros ( $So=0.0217$ ).
- Entre el cadenamiento 0+230 y el 0+250 se presenta una zona con pendiente pronunciada de aproximadamente un 15%.
- Entre el cadenamiento 0+250 y el 3+000, la pendiente es más suave, con un desnivel de 16.50 metros ( $So=0.006$ ).
- Entre el cadenamiento 3+000 y el 3+530, la pendiente se pronuncia y cuenta con un desnivel de 41.42 metros ( $So=0.078$ ).



- Entre el cadenamiento 3+530 y el 3+880, se presenta un columpio para continuar con pendiente ascendente hasta el 4+200 con un desnivel de 9 metros ( $So=0.028$ ).
- Entre el cadenamiento 4+200 al 8+810, donde se presenta la elevación más alta del perfil (cota 1610.83), se vuelve a presentar un columpio con pendientes irregulares en el tramo.
- Entre el cadenamiento 8+810 y el 10+690, se presenta una zona relativamente plana con desniveles irregulares cuyos valores no exceden el metro.
- Entre el cadenamiento 10+690 y el 13+620 se presenta un descenso pronunciado de 38.34 metros ( $So=0.013$ ).
- Entre el cadenamiento 13+630 y el 13+860 cambia a pendiente positiva con una diferencia de elevación de 21.78 metros ( $So=0.095$ ).
- Entre el cadenamiento 13+860 y el 14+460 se presenta nuevamente un columpio, siendo este punto también de los puntos con elevaciones mayores en el tramo (1508.14).
- Entre el cadenamiento 14+460 y el 18+310 se presenta nuevamente otro columpio, pero en este caso mucho más prolongado. La cota menor de este columpio es la 1537.95 en el 16+250.
- Entre el cadenamiento 18+310 y el 20+130 se presentan dos columpios. El nivel más bajo del primer columpio se presenta en el cadenamiento 18+630 y cota 1559.79, y en el segundo, en el cadenamiento 19+730 y cota 1563.69.
- Entre el cadenamiento 20+130 y el 25+470 se presentan lomeríos suaves generando 3 columpios. Los dos primeros cortos y no tan pronunciados. El tercero se presenta entre el cadenamiento 23+260 y el 25+470.
- Entre el cadenamiento 25+470 y el 25+870 la pendiente es ascendente y abrupta con un desnivel de 59.13 metros ( $So=0.01478$ ).
- Finalmente, del cadenamiento 25+870 al 25+907 la pendiente se suaviza, lo que sucede al llegar al Tanque de Cambio de Régimen con un desnivel de 0.83 metros ( $So=0.022$ ).

En la lámina 5.2 se muestra el perfil topográfico del acueducto en el tramo de impulsión.



Lámina 5.2 Perfil topográfico de la línea de impulsión

El tramo de acueducto con funcionamiento a gravedad tiene una longitud de 16.46 km con un desnivel total de 25.14 metros. La configuración topográfica se describe a continuación:

- Entre el cadenamiento 25+920 al cadenamiento 26+500 existe un desnivel de 21.6 metros ( $S_o=0.037$ ).
- Entre el cadenamiento 26+500 y el 26+700 se presenta una zona con pendiente ascendente pronunciada de aproximadamente 8% de pendiente.
- Entre el cadenamiento 26+700 y el 27+500, la pendiente es más suave y descendente, con un desnivel de 18.40 metros ( $S_o=0.023$ ).
- Entre el cadenamiento 27+500 y el 28+080, la pendiente es ascendente recuperando prácticamente la misma elevación con una pendiente del 3%.
- Entre el cadenamiento 28+080 y el 29+050, se presentan pendientes más suaves ( $S_o=0.02$ ).
- Entre el cadenamiento 29+050 al 29+560 se presenta un columpio con un descenso de aprox. 10 metros y pendiente del 25%.
- Entre el cadenamiento 29+560 y el 30+140 se presenta la pendiente ascendente del columpio con una pendiente del 3% nuevamente.
- En una longitud de 1000 metros y pendiente del 3.7% se vuelve a descender y se presenta nuevamente otro columpio.
- En el cadenamiento 31+140 inicia un ascenso hasta el 32+000 con pendiente del 1%.
- En el cadenamiento 32+000 se presenta la misma pendiente del 1% pero en descenso hasta el cadenamiento 33+000.
- A partir del cadenamiento 33+000 y hasta el 34+660 la pendiente de descenso es mayor y se presentan elevaciones cercanas a la 1520.
- Entre el cadenamiento 34+660 al 37+500 se presentan zonas relativamente planas con un ligero descenso.
- A partir del 37+500 en una longitud de 3500 metros se presentan ascensos con pendientes mínimas.
- En el cadenamiento 41+800 la pendiente aumenta al 2% en una longitud de aproximadamente 1000 metros para entonces aumentar la misma hasta cerca del 5.2% y alcanzar niveles cercanos a la 1540 en los últimos 600 metros del trazo.

De igual manera a partir de la información topográfica obtenida se determinó la configuración topográfica del tramo de la línea por gravedad. En la lámina 5.3 se muestra el perfil topográfico.

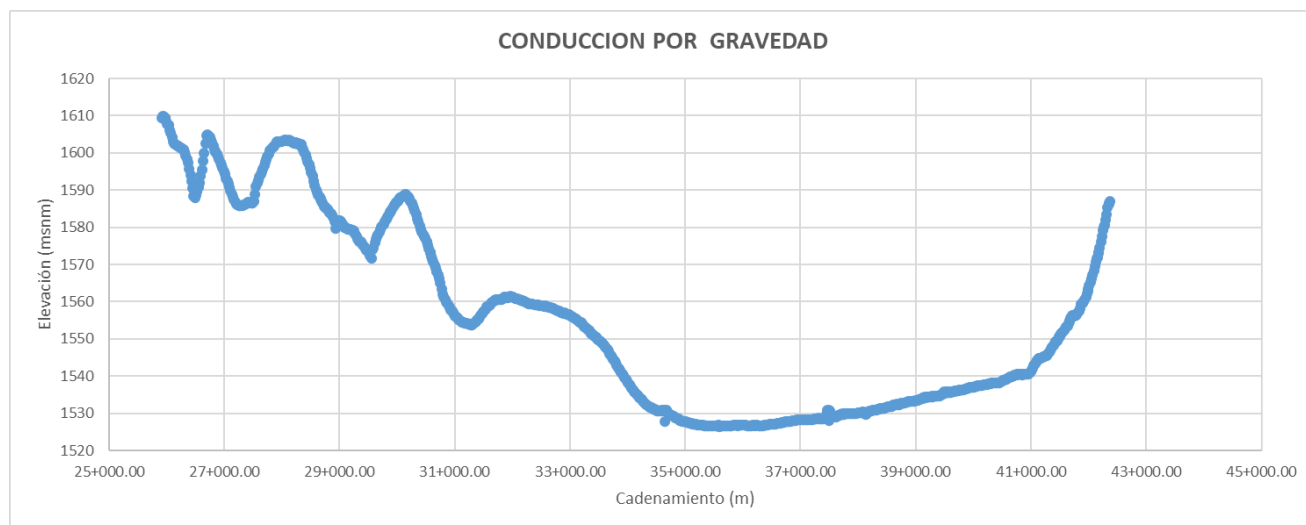


Lámina 5.3 Perfil topográfico de la línea de gravedad

## 5.2.2 Diámetro económico Línea de Impulsión

Tomando en consideración las condiciones topográficas que imperan entre los puntos con mayor elevación del tramo y el nivel del sitio destinado para la estación de bombeo los cuales se pueden observar en la Lámina 5.4 marcados en color rojo se propone lo siguiente:

- Se realizará el análisis del diámetro económico para diferentes materiales posibles para la tubería.
- Para el control del fenómeno transitorio se emplearán cámaras de aire y un tanque de oscilación en algún o algunos de los puntos más altos.
- Se colocará un tanque de cambio de régimen que funcionará de manera oscilante durante el transitorio.

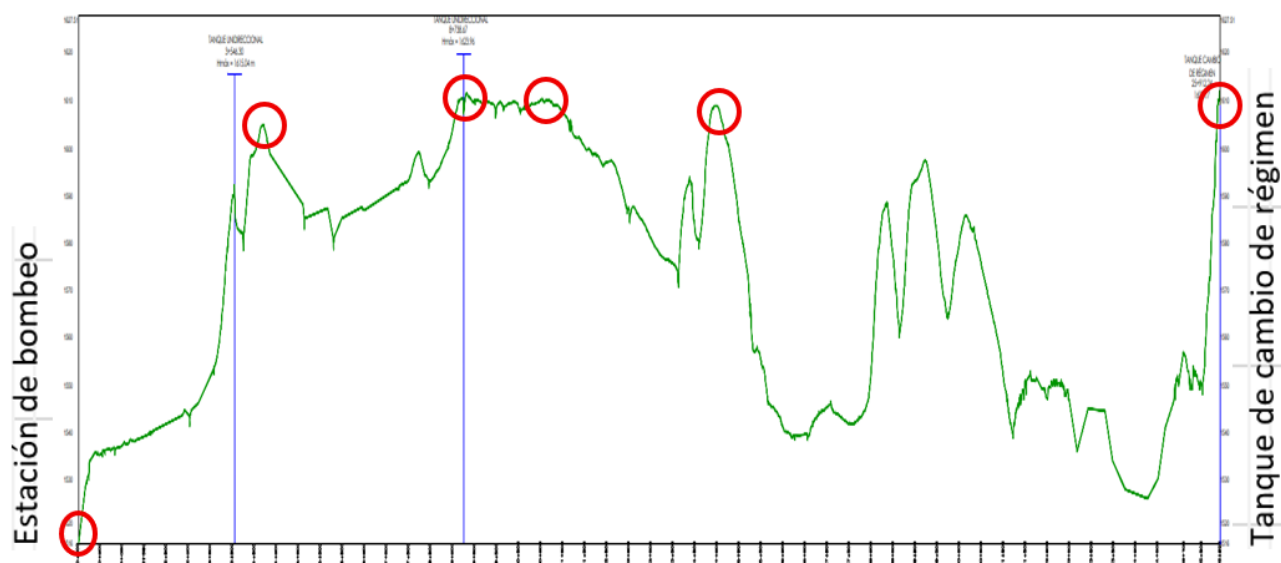


Lámina 5.4 Diseño conceptual de la línea de impulsión

Se analizaron diferentes diámetros y materiales para encontrar el diámetro más económico. Inicialmente se partió de las fórmulas de diámetro tentativo, derivadas de la fórmula de Dupuit las cuales se observan en la Tabla 5.1

Tabla 5.1 Aplicación de fórmulas para el diámetro tentativo

|                |                      |        |
|----------------|----------------------|--------|
| Dupuit/Bresser | $D = K Q^{1/2}$      | K=1.20 |
| Bonnin         | $D = Q^{1/2}$        |        |
| Krier          | $D = 0.89 Q^{0.486}$ |        |

Para la determinación del diámetro económico de la conducción, se realizaron cálculos hidráulicos considerando dos condiciones de gasto: el correspondiente al caudal concesionado de 7.5 m<sup>3</sup>/s y un gasto máximo de 10.0 m<sup>3</sup>/s asociado a un esquema de operación optimizado.

En la Tabla 5.2 se presentan los resultados obtenidos a partir de la aplicación de las diferentes fórmulas utilizadas para el dimensionamiento hidráulico, incluyendo para cada caso el gasto analizado, el diámetro resultante en unidades métricas e inglesas, así como el área hidráulica y la velocidad de flujo correspondiente.

Estos resultados permiten evaluar el comportamiento hidráulico del sistema bajo ambos valores de gasto, sirviendo como base para la selección del diámetro más adecuado en función de criterios de eficiencia hidráulica y operativa, asegurando en todo momento condiciones de flujo compatibles con un régimen estable y seguro para la conducción.

*Tabla 5.2 Cálculo de Diámetro Económico*

| Fórmula Utilizada | Gasto               | Diámetro | Diámetro | Área           | Velocidad |
|-------------------|---------------------|----------|----------|----------------|-----------|
|                   | m <sup>3</sup> /seg | m        | plg      | m <sup>2</sup> | m/s       |
| Dupuit/Bresser    | 10                  | 3.79     | 149      | 11.31          | 0.88      |
| Bonnin            | 10                  | 3.16     | 124      | 7.85           | 1.27      |
| Krier             | 10                  | 2.73     | 107      | 5.83           | 1.71      |
| Dupuit/Bresser    | 7.5                 | 3.29     | 129      | 8.48           | 0.88      |
| Bonnin            | 7.5                 | 2.74     | 108      | 5.89           | 1.27      |
| Krier             | 7.5                 | 2.37     | 93       | 4.41           | 1.70      |

Partiendo de ello, se definió realizar el análisis de diámetro económico con los diámetros comerciales disponibles para Acero ASTM A-53 en 110"- 106"- 100"; para Concreto Presforzado en 108"- 99", en Hierro Dúctil para 104" y para Poliester Reforzado de Fibra de Vidrio en 106"- 104"- 100". En la tabla 5.3 se muestran las características particulares de cada de las opciones disponibles.

*Tabla 5.3 Características Particulares de las tuberías analizadas*

*Notas: En tuberías de acero se consideró un espesor de 5/8". En tuberías de PRFV se consideró PN20 y S2500.*



| Material       | Diám nom | Diám nom | Diám Int | Ancho Cepa | Presión Max Disp | Peso/ mt | Long Tramo | Peso/Tramo | Tiempo Entrega * |
|----------------|----------|----------|----------|------------|------------------|----------|------------|------------|------------------|
|                | m        | plg      | m        | m          | kg/cm2           | kg       | m          | Ton        | días             |
| Acero          | 2.80     | 110.00   | 2.78     | 3.40       | 28.00            | 1088     | 12.20      | 13.27      | 20.00            |
| Acero          | 2.65     | 106.00   | 2.58     | 3.25       | 29.80            | 1028     | 12.20      | 12.54      | 20.00            |
| Acero          | 2.50     | 100.00   | 2.48     | 3.10       | 31.00            | 988      | 12.20      | 12.05      | 20.00            |
| PRFV           | 2.70     | 108.00   | 2.71     | 3.80       | 20.00            | 650      | 12.00      | 7.80       | 15.00            |
| PRFV           | 2.60     | 104.00   | 2.61     | 3.70       | 20.00            | 604      | 12.00      | 7.25       | 15.00            |
| PRFV           | 2.50     | 100.00   | 2.51     | 3.60       | 20.00            | 558      | 12.00      | 6.70       | 15.00            |
| Concreto Presf | 2.75     | 108.00   | 2.75     | 4.22       | 20.00            | 5065     | 5.00       | 25.33      | PREVIO PROG      |
| Concreto Presf | 2.48     | 99.00    | 2.50     | 3.88       | 20.00            | 4400     | 5.00       | 22.00      | PREVIO PROG      |
| HD             | 2.60     | 104.00   | 2.62     | 3.20       | 30.00            | 1655     | 6.00       | 9.93       | PREVIO PROG      |

Para la selección del tipo de tubería se realizó un análisis técnico económico en donde se tomaron en consideración los siguientes parámetros, los cuales fueron tabulados. Ver Tabla 5.4

- Resistencia y rigidez de la tubería.
- Durabilidad de la tubería.
- Rapidez de instalación
- Dificultad de mantenimiento.

*Tabla 5.4 Características de las tuberías analizadas*

| Concepto                                          | Acero        | PRFV      | HD           | Concreto presforzado |
|---------------------------------------------------|--------------|-----------|--------------|----------------------|
| Rugosidad absoluta para el diseño hidráulico (mm) | 0.100        | 0.029     | 0.120        | 0.250                |
| Velocidad máxima-mínima permisible (m/s)          | 5.00-0.30    | 3.00-0.30 | 5.00-0.30    | 3.50-0.30            |
| Desviación angular permisible                     | NA           | 1°        | 2°           | 40'                  |
| Límite elástico (MPa)                             | 190,000      | 10,000    | 170,000      | 17,636               |
| Ancho de cepa (m)                                 | 0.60 + Dn    | 1.10 + Dn | 0.60 + Dn    | 1.25 De + 0.30       |
| Colchón mínimo requerido sobre lomo de tubo (m)   | No requerido | 1.00      | No requerido | 1.20                 |

| Concepto          | Acero                                                                                         | PRFV                                                                                       | HD                                                                                                                                 | Concreto presforzado                                                                                                  |
|-------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Durabilidad       | +75 años                                                                                      | + de 50 años                                                                               | + 100 años<br>(hay casos de + 150 años)                                                                                            | + 75 años                                                                                                             |
| Sistema de unión  | Soldadura<br>Extremos bridados<br>Juntas mecánicas<br>para<br>extremos lisos o<br>ranurados   | Utilizan una<br>junta de caucho<br>elastomérico<br>REKA para el<br>sellado                 | Acoplamiento espiga<br>campana con anillo de hule<br>Extremos bridados<br>Junta mecánica<br>Junta Gibault                          | Acoplamiento espiga<br>campana<br>con anillo de hule<br>Uniones bridadas                                              |
| Piezas especiales | Alta disponibilidad,<br>se pueden fabricar<br>de tramos de<br>tubería unidos con<br>soldadura | Se fabrican<br>piezas en mismo<br>material y/o<br>pueden<br>utilizarse piezas<br>de acero. | Alta disponibilidad<br>Se fabrican de hierro fundido<br>con extremos lisos,<br>campana, campana para<br>junta mecánica, y bridados | Piezas de alma de acero<br>recubierta de concreto,<br>con<br>extremos espiga<br>campana, extremos lisos<br>o bridadas |

De forma cualitativa en la tabla 5.5. se presentan las fortalezas y debilidades de cada material..

*Tabla 5.5 Ventajas y desventajas de los diferentes materiales*

| Concepto    | Acero                                                                                                                                                                                                                                        | PRFV                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | Hierro Dúctil                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | Concreto presforzado                                                                                                                           |
|-------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Ventajas    | <ul style="list-style-type: none"> <li>Resiste presiones internas elevadas</li> <li>Mayor ligereza y bajo costo en comparación con tuberías de hierro fundido o de concreto</li> <li>Fácil adaptación a cualquier tipo de montaje</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>Larga vida útil</li> <li>No necesita medios de protección contra la corrosión</li> <li>Bajos costes de mantenimiento</li> <li>Propiedades hidráulicas que se mantienen constantes con el tiempo</li> <li>Menor coste de transporte</li> <li>Buena respuesta ante los transitorios</li> <li>Menor peso para instalación</li> <li>Menor adherencia en las paredes del tubo</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>Larga vida útil.</li> <li>Posee alta resistencia a impactos y a cargas normales y extraordinarias, así como a la presión interna</li> <li>Alta resistencia a la corrosión.</li> <li>Es prácticamente libre de mantenimiento</li> <li>El hierro dúctil puede ser soldado en forma</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>Alta resistencia mecánica a presiones internas y cargas externas</li> <li>Bajo mantenimiento</li> </ul> |
| Desventajas | <ul style="list-style-type: none"> <li>Es susceptible a la corrosión por lo que debe</li> </ul>                                                                                                                                              | <ul style="list-style-type: none"> <li>Baja resistencia a impactos y a cargas</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | <ul style="list-style-type: none"> <li>Es susceptible a la corrosión por lo que debe</li> </ul>                                                |

|  |                                                                                                                                                                                                                                            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                                                                                                                              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
|--|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  | <p>protegerse tanto el interior como el exterior.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• No soporta cargas externas ni vacíos parciales, pues es susceptible al aplastamiento</li> <li>• Requiere mantenimiento periódico</li> </ul> | <p>normales y extraordinarias</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Sensible a los asentamientos diferenciales</li> <li>• No se recomiendan las piezas que se utilizan en derivaciones, ya que éstas deben ser concéntricas. Por otro lado, los atraques en las deflexiones se deben envolver totalmente a las piezas.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mayor costo que otros tipos de tubería ya que la tubería debe importarse, lo cual implica que el tiempo de entrega esté sujeto a ingresos por aduanas y puede salirse de control por cualquier conflicto</li> </ul> | <p>protegerse en interior y exterior.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Conexiones especiales que requieren tiempo de fabricación excesiva</li> <li>• Mayor complejidad en la instalación (menor rendimiento)</li> <li>• Alto costo de transporte</li> <li>• Respuesta desfavorable ante los transitorios</li> <li>• En aguas incrustantes pierde rápidamente área hidráulica</li> <li>• Difícil de reparar en caso de sufrir daños</li> <li>• Mayor costo en obra civil <ul style="list-style-type: none"> <li>• Sensible a los asentamientos diferenciales</li> </ul> </li> </ul> |
|--|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

## Cálculo de los Costos de Inversión

A partir de la información anterior se calcularon los costos requeridos para la obra civil, costo del suministro e instalación de las tuberías en cada uno de los casos y utilizando los siguientes criterios:

- Para la obra civil se consideró una sección tipo con un talud de 30 grados con un 60% de material Tipo C y 40% de material Tipo A-B.
- Tubería de Acero: se consideró un espesor de cinco octavos de pulgada en las zonas altas y de tres cuartos de pulgada en la parte baja del perfil. La longitud considerada fue de 50% para el primer caso y 50% para el segundo caso.
- Tubería de poliéster reforzado, se consideró misma proporción en cuanto a longitud, pero para presiones de trabajo de 16 kilogramos por centímetro cuadrado en zonas altas y de 20 kilogramos por centímetro cuadrado en las zonas bajas.
- Tubería de concreto presforzado se consideró una presión nominal de 20 kilogramos por centímetro cuadrado que es la única disponible en toda la longitud.
- Tubería de hierro dúctil, la presión de trabajo disponible es de 25 kilogramos por centímetro cuadrado por lo cual se consideró toda la longitud en la misma clase.

En la tabla 5.6 se muestra el resumen para cada uno de los tipos de tubería seleccionados para el análisis desglosando los costos de la obra civil requerida y lo correspondiente a los costos por suministro e instalación de tuberías y las piezas especiales requeridas.



*Tabla 5.6 Análisis de Costos de Inversión*

| <b>Diámetro<br/>nom (plg)</b> | <b>Diámetro<br/>interno<br/>(mm)</b> | <b>Material</b> | <b>Velocidad<br/>(m/s)</b> | <b>CDT<br/>requerida</b> | <b>Costo de sum<br/>e inst tubería y<br/>pzaz esp (MDP)</b> | <b>Costo de obra<br/>civil (MDP)</b> | <b>Costo de la obra<br/>(MDP)</b> |
|-------------------------------|--------------------------------------|-----------------|----------------------------|--------------------------|-------------------------------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|
| 110                           | 2,778.13                             | Acero           | 1.30                       | 105.07                   | \$ 2,425.65                                                 | \$ 711.61                            | \$ 3,137.26                       |
| 106                           | 2,692.40                             | Acero           | 1.41                       | 106.74                   | \$ 2,343.37                                                 | \$ 671.08                            | \$ 3,014.45                       |
| 100                           | 2,508.24                             | Acero           | 1.52                       | 111.64                   | \$ 2,221.28                                                 | \$ 611.71                            | \$ 2,832.99                       |
| 108                           | 2,706.06                             | Prfv            | 1.30                       | 105.41                   | \$ 2,246.23                                                 | \$ 690.34                            | \$ 2,936.57                       |
| 104                           | 2,605.94                             | Prfv            | 1.41                       | 107.48                   | \$ 1,978.21                                                 | \$ 681.32                            | \$ 2,659.53                       |
| 100                           | 2,505.82                             | Prfv            | 1.52                       | 110.08                   | \$ 1,804.42                                                 | \$ 643.51                            | \$ 2,447.93                       |
| 108                           | 2,750.00                             | Concreto        | 1.26                       | 106.18                   | \$ 3,018.22                                                 | \$ 791.52                            | \$ 3,809.74                       |
| 99                            | 2,500.00                             | Concreto        | 1.53                       | 112.94                   | \$ 2,288.50                                                 | \$ 690.50                            | \$ 2,979.00                       |
| 104                           | 2,620.20                             | HD              | 1.70                       | 108.69                   | \$ 2,995.12                                                 | \$ 606.88                            | \$ 3,602.00                       |



## Cálculo de los Costos de Operación

Con base en los escenarios hidráulicos definidos para el dimensionamiento del sistema, se procedió a estimar los costos de energía eléctrica asociados a la operación de la línea de conducción.

En una primera condición, se consideró un régimen de operación continua de 24 horas con un gasto de 7.5 m<sup>3</sup>/s, correspondiente al caudal promedio concesionado. Bajo este esquema, se garantiza la conducción del volumen anual autorizado.

De manera complementaria, se evaluó un segundo escenario de operación optimizada, consistente en un régimen de bombeo de 18 horas diarias con un gasto máximo de 10.0 m<sup>3</sup>/s, el cual permite conducir el mismo volumen anual concesionado, desplazando la operación fuera de los horarios de mayor costo energético.

Los costos fueron estimados con base en el consumo de energía eléctrica por kilowatt-hora (kWh), utilizando la tarifa vigente al mes de agosto de 2025.

En la Tabla 5.7 se presentan los resultados correspondientes al escenario de operación continua (24 horas), en el cual se obtiene un costo unitario de energía de 1.72 pesos por kWh. Por su parte, en la Tabla 5.8 se muestran los resultados para el escenario de operación optimizada (18 horas), donde el costo unitario se reduce a 1.56 pesos por kWh.

La comparación entre ambos escenarios evidencia que la estrategia de operación intermitente permite una reducción en el costo unitario de la energía, derivado de la disminución del consumo en horarios de tarifa punta, manteniendo sin variación el volumen anual conducido y cumpliendo con las restricciones establecidas en el título de concesión.

*Tabla 5.7 Costo Consumo Energía para Bombeo de 24 Horas*

| COSTO POR CONSUMO EN KWH/R ANUAL USO CONTINUO 24 HORAS (tarifa ago 25) |            |                           |             |          |                 |                  |                 |                |
|------------------------------------------------------------------------|------------|---------------------------|-------------|----------|-----------------|------------------|-----------------|----------------|
| DEMANDA POR DIAS                                                       | TARIFA CFE | HORARIOS POR TIPO DEMANDA | HORAS EFECT | DIAS/SEM | DIAS CALENDARIO | DIAS PARA TARIFA | HORAS POR AÑO   | COSTO Kw/Hr    |
| LUNEA A VIERNES                                                        |            |                           |             |          |                 |                  |                 |                |
| demanda base                                                           | \$ 1.1829  | 0-6 hrs                   | 6.00        | 5        | 261             | 254              | 1,524.00        | \$ 1,802.74    |
| demanda intermedia                                                     | \$ 1.9600  | 6-19 hrs y 22-24 hrs      | 15.00       | 5        | 261             | 254              | 3,810.00        | \$ 7,467.60    |
| demanda punta                                                          | \$ 2.3203  | 19-22 hrs                 | 3.00        | 5        | 261             | 254              | 762.00          | \$ 1,768.07    |
| SABADOS                                                                |            |                           |             |          |                 |                  |                 |                |
| demanda base                                                           | \$ 1.1829  | 0-7 hrs                   | 7.00        | 1        | 52              | 52               | 364.00          | \$ 430.58      |
| demanda intermedia                                                     | \$ 1.9600  | 7-24 hrs                  | 17.00       | 1        | 52              | 52               | 884.00          | \$ 1,732.64    |
| DOMINGOS - FESTIVOS                                                    |            |                           |             |          |                 |                  |                 |                |
| demanda base                                                           | \$ 1.1829  | 0-19 hrs y 23-24 hrs      | 20.00       | 1        | 52              | 59               | 1,180.00        | \$ 1,395.82    |
| demanda intermedia                                                     | \$ 1.9600  | 19-23 hrs                 | 4.00        | 1        | 52              | 59               | 236.00          | \$ 462.56      |
| <b>SUMAS</b>                                                           |            |                           |             |          | <b>365</b>      | <b>365</b>       | <b>8,760.00</b> | <b>\$ 1.72</b> |

*Tabla 5.8 Costo Consumo Energía para Bombeo de 24 Horas*

| COSTO POR CONSUMO EN KWH/HR ANUAL PARA 18 HORAS FUERA DE HORARIO PUNTA ( tarifa ago 25) |            |                           |             |          |                 |                  |                 |                 |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|------------|---------------------------|-------------|----------|-----------------|------------------|-----------------|-----------------|
| DEMANDA POR DIAS                                                                        | TARIFA CFE | HORARIOS POR TIPO DEMANDA | HORAS EFECT | DIAS/SEM | DIAS CALENDARIO | DIAS PARA TARIFA | HORAS TOTALES   | COSTO GEN Kw/Hr |
| LUNEEA VIERNES                                                                          |            |                           |             |          |                 |                  |                 |                 |
| demanda base                                                                            | \$ 1.1440  | 0-6 hrs                   | 6.00        | 5        | 261             | 254              | 1,524.00        | \$ 1,743.46     |
| demanda intermedia                                                                      | \$ 1.8911  | 6-19 hrs y 22-24 hrs      | 12.00       | 5        | 261             | 254              | 3,048.00        | \$ 5,764.07     |
| demanda punta                                                                           | \$ 2.2370  | 19-22 hrs                 | -           | 5        | 261             | 254              | -               | \$ -            |
| SABADOS                                                                                 |            |                           |             |          |                 |                  |                 |                 |
| demanda base                                                                            | \$ 1.1440  | 0-7 hrs                   | 7.00        | 1        | 52              | 52               | 364.00          | \$ 416.42       |
| demanda intermedia                                                                      | \$ 1.8911  | 7-24 hrs                  | 11.00       | 1        | 52              | 52               | 572.00          | \$ 1,081.71     |
| DOMINGOS - FESTIVOS                                                                     |            |                           |             |          |                 |                  |                 |                 |
| demanda base                                                                            | \$ 1.1440  | 0-19 hrs y 23-24 hrs      | 18.00       | 1        | 52              | 59               | 1,062.00        | \$ 1,214.93     |
| demanda intermedia                                                                      | \$ 1.8911  | 19-23 hrs                 | -           | 1        | 52              | 59               | -               | \$ -            |
| <b>SUMAS</b>                                                                            |            |                           |             |          | <b>365</b>      | <b>365</b>       | <b>6,570.00</b> | <b>\$ 1.56</b>  |

Para el cálculo final de operación se consideraron además del costo fijo anual, el costo mensual por kilowatt consumido y los costos por capacidad en base a las tarifas de agosto de 2025. El criterio para considerar la eficiencia del equipo de bombeo fue de 84%.

A continuación, se muestran los costos de operación finales para todas las tuberías y con los dos escenarios. En la tabla 5.9 se muestra para 24 horas de bombeo y en la Tabla 5.10 para 18 horas de bombeo. Los valores se muestran en millones de pesos (MDP)

*Tabla 5.9 Análisis de Costos de Operación para 24 horas de bombeo*

| Diámetro nom (plg) | Diámetro interno (mm) | Material | Velocidad (m/s) | CDT requerida | HP requeridos | Demanda max kw | kwh anuales | Costo por kwh | Costo anual Consumo Energía | Costo Fijo Anual CFE | Costo Total anual de energía eléctrica (MDP) |
|--------------------|-----------------------|----------|-----------------|---------------|---------------|----------------|-------------|---------------|-----------------------------|----------------------|----------------------------------------------|
| 110                | 2,778.13              | Acero    | 1.30            | 112.34        | 13,168.59     | 9,823.77       | 86,021,617  | \$ 1.72       | \$ 147,957,181.57           | \$ 13,405.80         | \$ 147.97                                    |
| 106                | 2,692.40              | Acero    | 1.41            | 115.41        | 13,529.06     | 10,092.68      | 88,376,324  | \$ 1.72       | \$ 152,007,277.46           | \$ 13,405.80         | \$ 152.02                                    |
| 100                | 2,508.24              | Acero    | 1.52            | 124.38        | 14,580.55     | 10,877.09      | 95,245,019  | \$ 1.72       | \$ 163,821,431.96           | \$ 13,405.80         | \$ 163.83                                    |
| 108                | 2,706.06              | Prfv     | 1.30            | 114.73        | 13,449.31     | 10,033.19      | 87,855,370  | \$ 1.72       | \$ 151,111,235.70           | \$ 13,405.80         | \$ 151.12                                    |
| 104                | 2,605.94              | Prfv     | 1.41            | 118.98        | 13,947.73     | 10,405.01      | 91,111,234  | \$ 1.72       | \$ 156,711,321.87           | \$ 13,405.80         | \$ 156.72                                    |
| 100                | 2,505.82              | Prfv     | 1.52            | 124.39        | 14,581.80     | 10,878.02      | 95,253,149  | \$ 1.72       | \$ 163,835,416.85           | \$ 13,405.80         | \$ 163.85                                    |
| 108                | 2,750.00              | Concreto | 1.26            | 113.51        | 13,306.32     | 9,926.52       | 86,921,328  | \$ 1.72       | \$ 149,504,684.55           | \$ 13,405.80         | \$ 149.52                                    |
| 99                 | 2,500.00              | Concreto | 1.53            | 125.30        | 14,688.08     | 10,957.31      | 95,947,397  | \$ 1.72       | \$ 165,029,522.56           | \$ 13,405.80         | \$ 165.04                                    |
| 104                | 2,620.20              | HD       | 1.85            | 118.84        | 13,931.51     | 10,392.91      | 91,005,247  | \$ 1.72       | \$ 156,529,024.45           | \$ 13,405.80         | \$ 156.54                                    |

*Tabla 5.10 Análisis de Costos de Operación para 18 horas de bombeo*

| Diámetro nom (plg) | Diámetro interno (mm) | Material | Velocidad (m/s) | CDT requerida | HP requeridos | Demanda max kw | kwh anuales | Costo por kwh | Costo anual Consumo Energía | Costo Fijo Anual CFE | Costo Total anual de energía eléctrica (MDP) |
|--------------------|-----------------------|----------|-----------------|---------------|---------------|----------------|-------------|---------------|-----------------------------|----------------------|----------------------------------------------|
| 110                | 2,778.13              | Acero    | 1.65            | 126.43        | 19,761.35     | 14,741.97      | 96,815,782  | \$ 1.56       | \$ 151,032,619.46           | \$ 13,405.80         | \$ 151.05                                    |
| 106                | 2,692.40              | Acero    | 1.76            | 133.20        | 20,818.77     | 15,530.80      | 101,996,341 | \$ 1.56       | \$ 159,114,291.79           | \$ 13,405.80         | \$ 159.13                                    |
| 100                | 2,508.24              | Acero    | 2.02            | 146.95        | 22,968.45     | 17,134.46      | 112,528,134 | \$ 1.56       | \$ 175,543,889.00           | \$ 13,405.80         | \$ 175.56                                    |
| 108                | 2,706.06              | Prfv     | 1.74            | 129.81        | 20,288.81     | 15,135.45      | 99,399,946  | \$ 1.56       | \$ 155,063,915.53           | \$ 13,405.80         | \$ 155.08                                    |
| 104                | 2,605.94              | Prfv     | 1.87            | 137.36        | 21,469.45     | 16,016.21      | 105,184,167 | \$ 1.56       | \$ 164,087,300.09           | \$ 13,405.80         | \$ 164.10                                    |
| 100                | 2,505.82              | Prfv     | 2.03            | 146.97        | 22,971.45     | 17,136.70      | 112,542,843 | \$ 1.56       | \$ 175,566,834.35           | \$ 13,405.80         | \$ 175.58                                    |
| 108                | 2,750.00              | Concreto | 1.68            | 127.64        | 19,950.32     | 14,882.94      | 97,741,587  | \$ 1.56       | \$ 152,476,875.95           | \$ 13,405.80         | \$ 152.49                                    |
| 99                 | 2,500.00              | Concreto | 2.04            | 148.58        | 23,223.44     | 17,324.68      | 113,777,396 | \$ 1.56       | \$ 177,492,737.48           | \$ 13,405.80         | \$ 177.51                                    |
| 104                | 2,620.20              | HD       | 1.85            | 137.12        | 21,431.14     | 15,987.63      | 104,996,480 | \$ 1.56       | \$ 163,794,509.44           | \$ 13,405.80         | \$ 163.81                                    |

Finalmente se calculó la amortización del costo de Inversión a un período de 20 años y se agregó el costo de operación anual en ambos escenarios, obteniendo los costos para la elección del diámetro económico. Los valores se muestran en las Tablas 5.11 y 5.12 para 24 horas de bombeo y 18 horas de bombeo respectivamente. Las unidades utilizadas para el costo son millones de pesos. (MDP).

*Tabla 5.11 Análisis de Costos Anuales para 24 horas de bombeo*

| Diámetro nom (plg) | Diámetro interno (mm) | Material | Costo de la obra (MDP) | HP requeridos | Costo Total anual de energía eléctrica (MDP) | Amortiz. anual a 20 años + Consumo de energía eléctrica (MDP) |
|--------------------|-----------------------|----------|------------------------|---------------|----------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|
| 110                | 2,778.13              | Acero    | \$ 3,137.26            | 13,168.59     | \$ 147.97                                    | \$ 304.83                                                     |
| 106                | 2,692.40              | Acero    | \$ 3,014.45            | 13,529.06     | \$ 152.02                                    | \$ 302.74                                                     |
| 100                | 2,508.24              | Acero    | \$ 2,832.99            | 14,580.55     | \$ 163.83                                    | \$ 305.48                                                     |
| 108                | 2,706.06              | Prfv     | \$ 2,936.57            | 13,449.31     | \$ 151.12                                    | \$ 297.95                                                     |
| 104                | 2,605.94              | Prfv     | \$ 2,659.53            | 13,947.73     | \$ 156.72                                    | \$ 289.70                                                     |
| 100                | 2,505.82              | Prfv     | \$ 2,447.93            | 14,581.80     | \$ 163.85                                    | \$ 286.25                                                     |
| 108                | 2,750.00              | Concreto | \$ 3,809.74            | 13,306.32     | \$ 149.52                                    | \$ 340.01                                                     |
| 99                 | 2,500.00              | Concreto | \$ 2,979.00            | 14,688.08     | \$ 165.04                                    | \$ 313.99                                                     |
| 104                | 2,620.20              | HD       | \$ 3,602.00            | 13,931.51     | \$ 156.54                                    | \$ 336.64                                                     |

*Tabla 5.12 Análisis de Costos Anuales para 18 horas de bombeo*



| <b>Diámetro<br/>nom (plg)</b> | <b>Diámetro<br/>interno<br/>(mm)</b> | <b>Material</b> | <b>Costo de la<br/>obra (MDP)</b> | <b>HP<br/>requeridos</b> | <b>Costo<br/>Total anual<br/>de energía<br/>eléctrica<br/>(MDP)</b> | <b>Amortización<br/>anual a 20<br/>años +<br/>Consumo de<br/>energía<br/>eléctrica (MDP)</b> |
|-------------------------------|--------------------------------------|-----------------|-----------------------------------|--------------------------|---------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|
| 110                           | 2,778.13                             | Acero           | \$ 3,137.26                       | 19,761.35                | \$ 151.05                                                           | \$ 307.91                                                                                    |
| 106                           | 2,692.40                             | Acero           | \$ 3,014.45                       | 20,818.77                | \$ 159.13                                                           | \$ 309.85                                                                                    |
| 100                           | 2,508.24                             | Acero           | \$ 2,832.99                       | 22,968.45                | \$ 175.56                                                           | \$ 317.21                                                                                    |
| 108                           | 2,706.06                             | Prfv            | \$ 2,936.57                       | 20,288.81                | \$ 155.08                                                           | \$ 301.91                                                                                    |
| 104                           | 2,605.94                             | Prfv            | \$ 2,659.53                       | 21,469.45                | \$ 164.10                                                           | \$ 297.08                                                                                    |
| 100                           | 2,505.82                             | Prfv            | \$ 2,447.93                       | 22,971.45                | \$ 175.58                                                           | \$ 297.98                                                                                    |
| 108                           | 2,750.00                             | Concreto        | \$ 3,809.74                       | 19,950.32                | \$ 152.49                                                           | \$ 342.98                                                                                    |
| 99                            | 2,500.00                             | Concreto        | \$ 2,979.00                       | 23,223.44                | \$ 177.51                                                           | \$ 326.46                                                                                    |
| 104                           | 2,620.20                             | HD              | \$ 3,602.00                       | 21,431.14                | \$ 163.81                                                           | \$ 343.91                                                                                    |

De los datos obtenidos, la tubería que resultó más económica es la tubería de PRFV en un diámetro nominal de 100 pulgadas para un horario de bombeo de 24 horas con un costo anual de 286.25 millones de pesos por año. Al ser una tubería plástica, presenta además costos de mantenimiento bajos y es la de menor posibilidad con afectaciones por incrustación. Sin embargo, presenta baja resistencia a impactos por cargas normales, extraordinarias o accidentales. Esta característica la hace de alto riesgo ya que cualquier excavación cercana a la tubería pudiera ocasionar ruptura en el tubo. En base a la información preliminar de geotecnia, por lo menos el 50% del trazo puede presentar zonas con materiales Tipo C que pueden empeorar las condiciones de fragilidad de la tubería.

La segunda alternativa, con un costo anual de 302.74 millones de pesos resultó ser la tubería de acero con diámetro nominal de 106 pulgadas y con la condición de 24 horas de bombeo. Esto representaría un diferencial de 16.49 millones de pesos anuales.

En conjunto con personal tanto de la SGIA, CEA y SIAPA, se concluyó que la opción de la tubería de acero de 106 pulgadas de diámetro es la mejor opción debido a que los costos anuales en comparación con los de la tubería de poliéster reforzada con fibra de vidrio son marginalmente menores y la tubería de acero representa una mayor seguridad para el acueducto, siendo mucho más importante a largo plazo esta característica al disminuir las posibilidades de falla que dejarían sin servicio al 60% de la población del Área Metropolitana.

### 5.2.3 Diámetro económico Línea de Gravedad

En base a las conclusiones anteriores y habiendo determinado que el material elegido será la tubería de acero en el primer tramo, se procedió a determinar el diámetro económico en el tramo que funcionará a gravedad. Para ello se realizó el cálculo de las pérdidas por fricción para 3 diámetros que serán 100, 106 y 110 pulgadas. En este caso, el diámetro más económico



será el que se encuentre dentro del rango de la carga disponible definida por el desnivel topográfico. En este caso se dispone de 25.14 metros considerando los niveles de superficie libre del agua entre el Tanque de Cambio de Régimen de la línea de impulsión y el del Tanque de Entrega en el Cerro del 4.

El cálculo se realizará para los dos gastos de diseño de la misma manera que en el caso de la línea de impulsión, ya que se determinó que el bombeo de 18 horas es el más económico y, por lo tanto, el tramo de gravedad deberá conducir el mismo gasto hasta el punto de entrega. Otra alternativa posible sería considerar un volumen de regulación en el Tanque de cambio de régimen nuevo para la diferencia del gasto de conducción lo cual no es posible porque no se cuenta con el espacio disponible.

De Los resultados obtenidos se puede concluir que la tubería de 100 pulgadas de acero no podría conducir el gasto requerido de 10 metros cúbicos por segundo ya que la energía disponible sería negativa. La tubería de 106 pulgadas de diámetro tiene el menor remanente de energía y por lo tanto es el diámetro más económico. Por otro lado, las velocidades permisibles en la tubería se encuentran dentro de los rangos establecidos.

Los resultados se muestran en la Tabla 5.13 donde se pueden ver los datos para cada una de los diferentes diámetros.

*Tabla 5.13 Cálculo de Diámetro Económico Tramo Gravedad*

| Diámetro Interior                                                                   |         | Área.             | Gasto                | Velocidad | Longitud  | Numero de     | Coeficiente | Perdida de   | Otras Perdidas | Carga Total | Energía    |
|-------------------------------------------------------------------------------------|---------|-------------------|----------------------|-----------|-----------|---------------|-------------|--------------|----------------|-------------|------------|
| mm                                                                                  | pulgada | (m <sup>2</sup> ) | (m <sup>3</sup> /s.) | (m/s)     | (m.)      | Reynolds      | de Fricción | Fricción (m) | 5% (m.)        | Final (m.)  | Disponible |
| TABLA PARA EL CALCULO DE CARGA DINAMICA LINEA DE CONDUCCION 3 ALTERNATIVAS EN ACERO |         |                   |                      |           |           |               |             |              |                |             |            |
| 2,508.24                                                                            | 100.00  | 4.941             | 10.000               | 2.024     | 16,497.00 | 5,076,215.065 | 0.0200      | 27.46        | 1.43           | 28.89       | -4.74      |
| 2,660.64                                                                            | 106.00  | 5.560             | 10.000               | 1.799     | 16,497.00 | 4,785,452.250 | 0.0200      | 20.45        | 1.06           | 21.51       | 2.64       |
| 2,762.24                                                                            | 110.00  | 5.993             | 10.000               | 1.669     | 16,497.00 | 4,609,434.978 | 0.0200      | 16.95        | 0.88           | 17.83       | 6.32       |
| 2,508.24                                                                            | 100.00  | 4.941             | 7.500                | 1.518     | 16,497.00 | 3,807,161.298 | 0.0200      | 15.45        | 0.80           | 16.25       | 7.90       |
| 2,660.64                                                                            | 106.00  | 5.560             | 7.500                | 1.349     | 16,497.00 | 3,589,089.187 | 0.0200      | 11.50        | 0.60           | 12.10       | 12.05      |
| 2,762.24                                                                            | 110.00  | 5.993             | 7.500                | 1.252     | 16,497.00 | 3,457,076.233 | 0.0200      | 9.54         | 0.50           | 10.03       | 14.12      |

Otro punto a favor de la elección del diámetro de 106 pulgadas es la de tener un diámetro igual tanto en bombeo como en gravedad.

## 5.2.4. Alternativas para la Selección de Equipo de Bombeo

Con el fin de establecer los criterios técnicos, hidráulicos, geométricos, constructivos y normativos que regirán el desarrollo integral del diseño mecánico de la planta de bombeo, garantizando que todos los equipos, estructuras, tuberías, accesorios y sistemas hidráulicos se seleccionen y dimensionen conforme a los caudales de diseño, condiciones del sitio, características del fluido y filosofía de operación requerida se realizaron los análisis de las alternativas de los posibles tipos de equipos de bombeo a emplear en el proyecto para asegurar que opere con eficiencia, seguridad y confiabilidad, cumpliendo los estándares nacionales e internacionales aplicables.

Para la selección del equipo se consideró un caudal de diseño nominal de 10 metros cúbicos por segundo y deberá tomarse en cuenta la infraestructura existente actual en la Estación de Bombeo de Chapala la cual cuenta con un máximo de seis espacios disponibles para ubicación de los equipos cuyas dimensiones son de 2.5 metros de ancho, 4.00 metros de largo y 13.50 metros de profundidad. Deberá contar con flexibilidad operativa para escalonamiento del caudal en caso de ser necesario. Estas definiciones están dadas por la Comisión Estatal del Agua de Jalisco como el organismo operador SIAPA.

Se elaboró una curva del sistema en base a los niveles de operación del Lago de Chapala que previamente se definieron como nivel de aguas máximas ordinarias (NAMO) la cota 1522 msnm y como nivel de aguas mínimas la cota 1516 msnm y de acuerdo con el cálculo de pérdidas del acueducto en base al diámetro económico definido.

En dicha curva se consignan las cargas dinámicas totales con intervalos a cada medio metro cúbico por segundo. La curva descrita se puede apreciar en la Figura 5.5 y los datos numéricos se muestran en la Tabla 5.14.

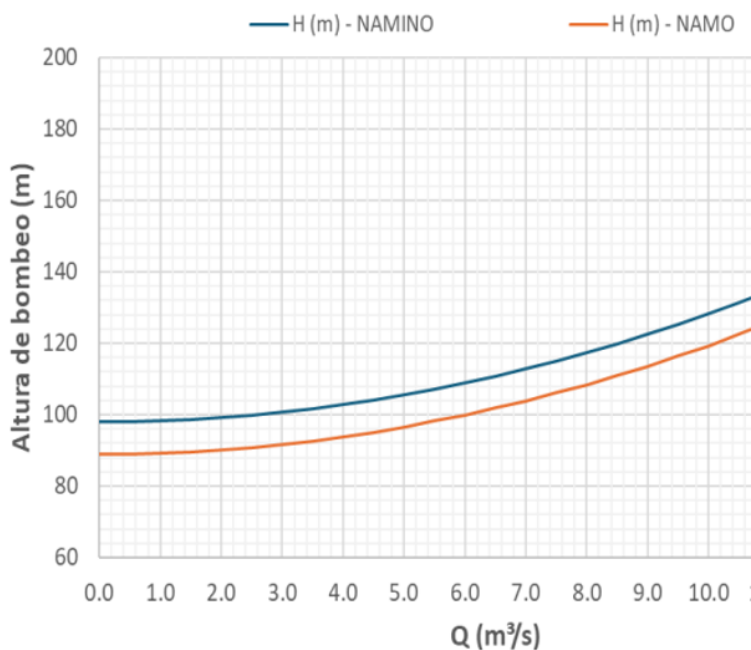
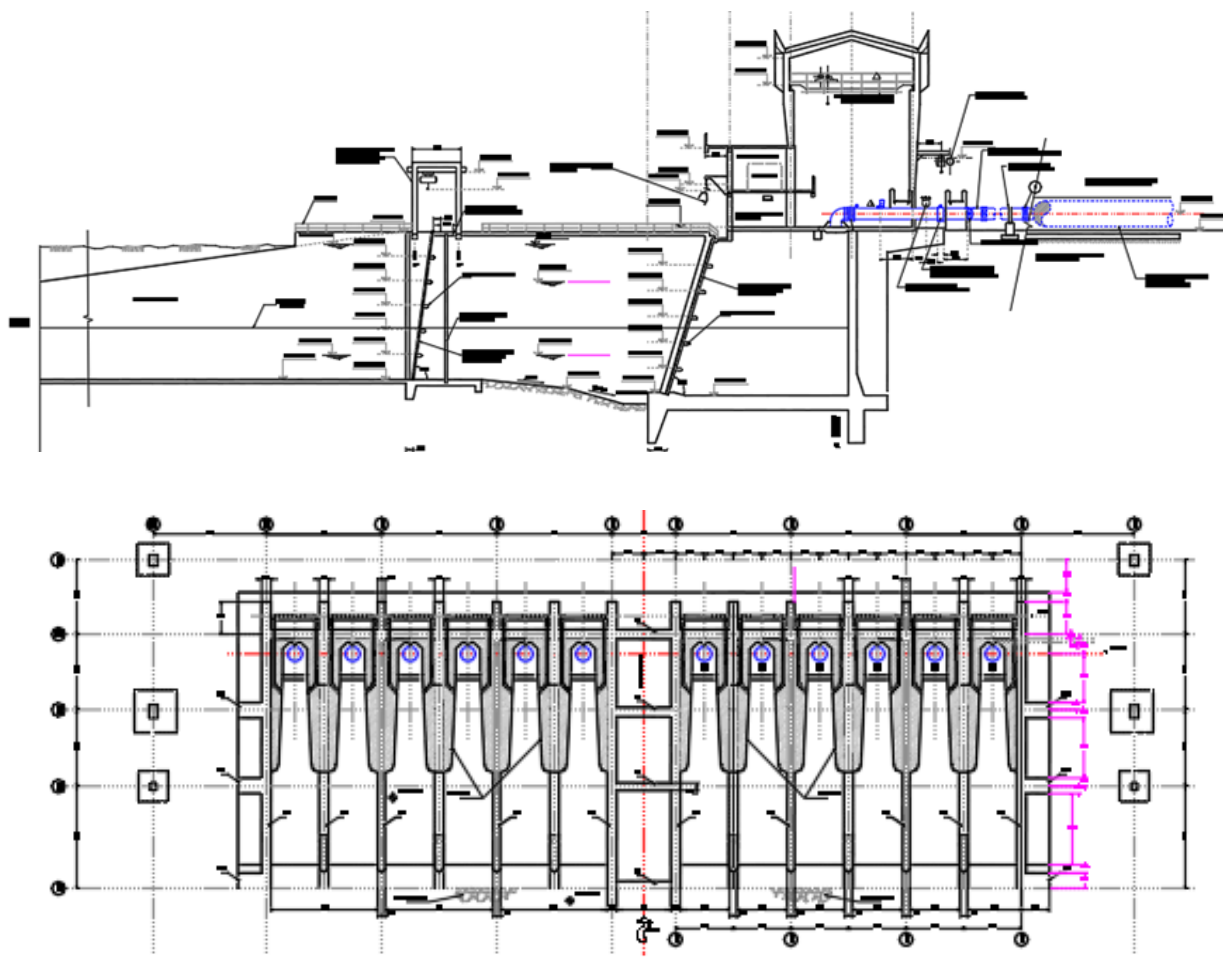


Figura 5.5 Curva del Sistema para la Selección del Equipo de Bombeo

Tabla 5.14 Datos de Cargas dinámicas totales para Selección de Equipo de Bombeo

| Q (m3/s) | H (m) -<br>NAMINO | H (m) -<br>NAMO |
|----------|-------------------|-----------------|
| 0.0      | 98.0              | 89.0            |
| 0.5      | 98.1              | 89.1            |
| 1.0      | 98.3              | 89.3            |
| 1.5      | 98.7              | 89.7            |
| 2.0      | 99.2              | 90.2            |
| 2.5      | 99.9              | 90.9            |
| 3.0      | 100.7             | 91.7            |
| 3.5      | 101.7             | 92.7            |
| 4.0      | 102.9             | 93.9            |
| 4.5      | 104.2             | 95.2            |
| 5.0      | 105.6             | 96.6            |
| 5.5      | 107.2             | 98.2            |
| 6.0      | 108.9             | 99.9            |
| 6.5      | 110.8             | 101.8           |
| 7.0      | 112.9             | 103.9           |
| 7.5      | 115.1             | 106.1           |
| 8.0      | 117.5             | 108.5           |
| 8.5      | 120.0             | 111.0           |
| 9.0      | 122.6             | 113.6           |
| 9.5      | 125.4             | 116.4           |
| 10.0     | 128.4             | 119.4           |

En la figura 5.6 se puede observar la planta y la sección longitudinal de la infraestructura actual en la Estación de Bombeo la cual deberá considerarse en la selección.



*Figura 5.6 Planta y Sección Longitudinal de la Estación de Bombeo Chapala*

Para la selección de los equipos de bombeo se debe considerar que la instalación requerida es de operación continua y que garantizarse una vida útil mayor a veinte años. Dentro las alternativas posibles de tipos de bombas para el Acueducto Chapala se visualizan dos tipos de equipos que son los verticales y los sumergibles. Se presentan las características generales de ambos.



## Características de Bombas Verticales

Las bombas verticales son equipos diseñados específicamente para grandes caudales y alturas de elevación, típicas en tomas de agua de mar, agua de enfriamiento y captación industrial. En este tipo de bombas el motor se encuentra en la superficie y transmite potencia a través de un eje vertical hacia el impulsor ubicado dentro del cárcamo.

Las características principales de estos equipos son contar con eficiencias entre 80% y 88%, menor consumo de potencia, acceso sencillo al motor y partes mecánicas para mantenimiento sin embargo como cuenta con muchas partes mecánicas requiere mayor tiempo para el mismo, menor requerimiento de obra civil, los materiales de fabricación disponibles en el mercado son hierro fundido, acero inoxidable, bronce, dúplex.

## Características de Bombas Sumergibles

Las bombas sumergibles centrífugas verticales son equipos compactos con motor integrado diseñado para trabajar completamente sumergido. Son equipos modulares con rodetes semi axiales y motor sumergible acoplado directamente. Están diseñadas para operar en condiciones exigentes y ofrecen alta eficiencia en grandes caudales y alturas de elevación.

Las características principales de estos equipos es que requieren de poca obra civil. menor consumo de energía eléctrica que las verticales, poco mantenimiento al contar con menos elementos mecánicos, los materiales de fabricación disponibles en el mercado son hierro fundido, acero inoxidable (304,316,904L), dúplex y super dúplex.

## Alternativas de Equipos

En base a lo anterior y de acuerdo con marcas comerciales disponibles y que presentaron su oferta se presentan los modelos y las curvas características de cuatro modelos de los cuales tres son bombas verticales y uno es sumergible.

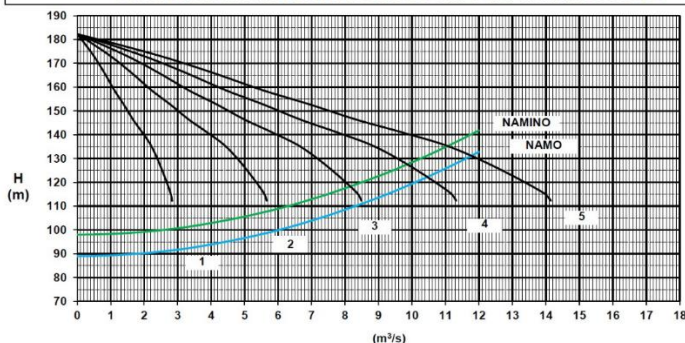
- **KSB Modelo SEZ 800-1010/2**  
Tipo Turbina Vertical, Motor en Superficie, eje vertical, impulsores multietapa

| Modelo / Pump Model | Etapas / Stages | Rotación / Speed         | Dia. Impulsor / Impeller Dia. |
|---------------------|-----------------|--------------------------|-------------------------------|
| <b>SEZ 800-1010</b> | <b>2</b>        | <b>715 rpm</b>           |                               |
| Proyecto / Project  |                 | Oferta No. / Project No. | Item / Tag                    |
| Caudal (LPS)        | 2000            | Carga (m)                | 132                           |
| Eficiencia %        | 83              | BHP (HP)                 | 4342.1                        |



KSB de México S.A. de C.V.  
Av. Toluca No. 19  
Col. San Pedro Puente de Cerritos C.P. 76148  
Querétaro, Qro., México.

**CURVA CARACTERÍSTICA DE BOMBA / PUMP PERFORMANCE CURVE**





Comisión Estatal del  
Agua Jalisco

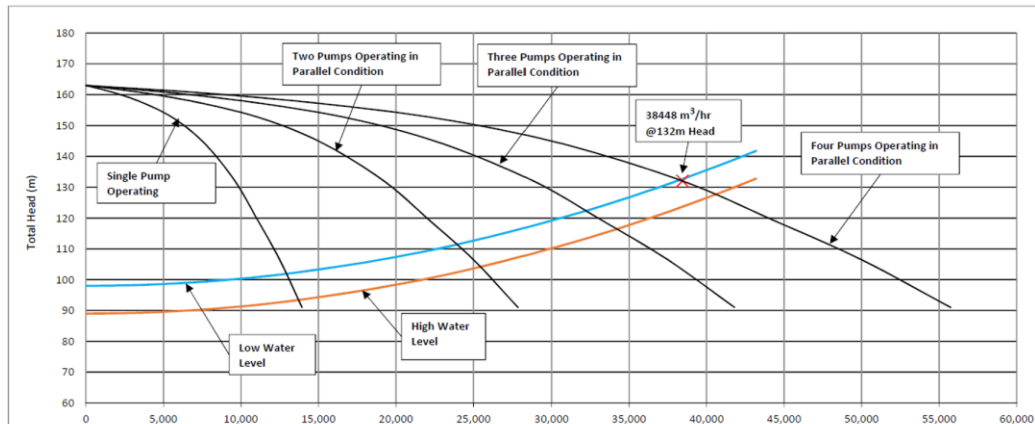


- **KBL Modelo BHR-125-N**  
Tipo Turbina Vertical, Motor en Superficie, eje vertical, impulsores multietapa

Curva Característica de Equipo de Bombeo

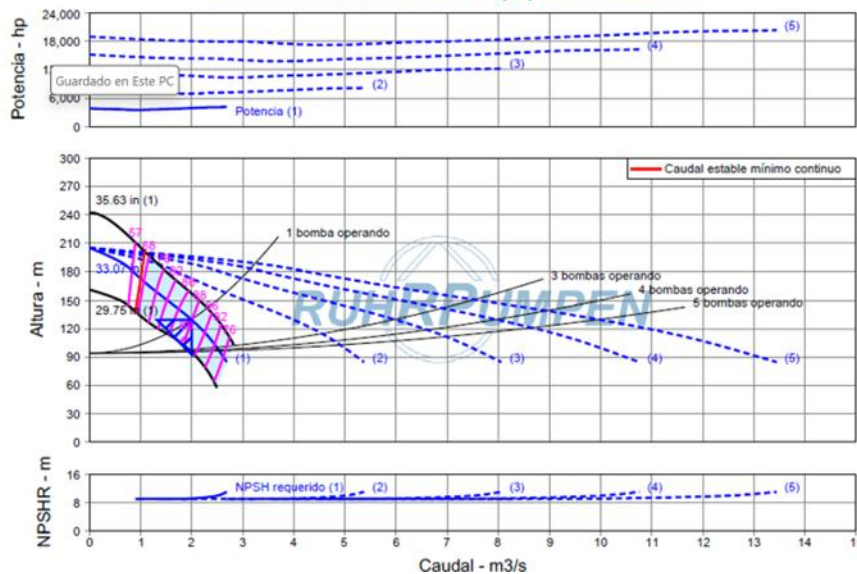


KBL



- **RURHPUMPEN Modelo 48KXL-3**  
Tipo Turbina Vertical, Motor en Superficie, eje vertical, impulsores multietapa

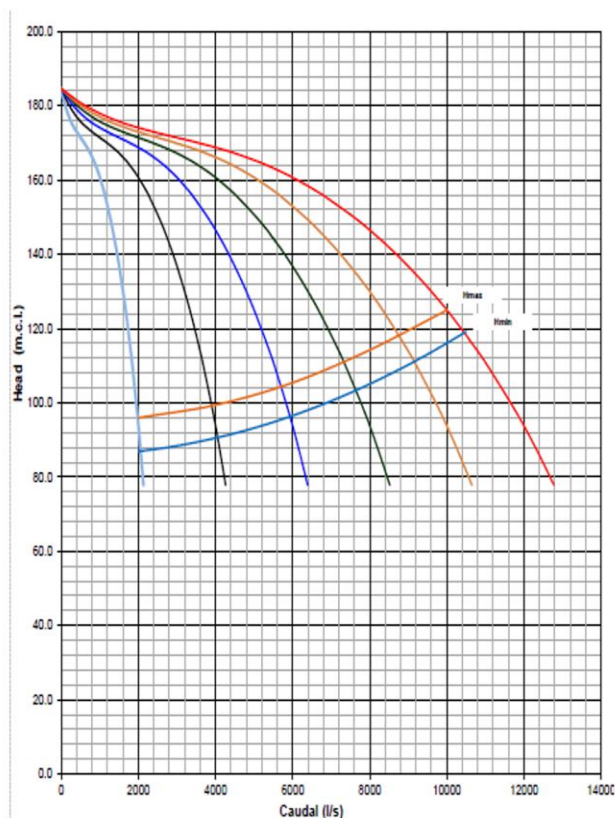
Curva Característica de Equipo de Bombeo



- **INDAR Modelo UGP-4810**  
Centrifuga Vertical Sumergible, Motor e Impulsor dentro del líquido

### Curva Característica de Equipo de Bombeo

**Indar**



Lago a nivel mínimo - NAMINO

| Nº Bombas | Hm (m) | Qtot (l/s) | Qu (l/s) | Rend (%) | Peje (kW) | NPSHr (m) | % BEP |
|-----------|--------|------------|----------|----------|-----------|-----------|-------|
| 1         | 99.1   | 2185       | 2185     | 80.3     | 2645      | 14.5      | 122   |
| 2         | 102.3  | 4315       | 2158     | 81.2     | 2666      | 14.3      | 121   |
| 3         | 107.2  | 6345       | 2115     | 82.5     | 2696      | 13.9      | 118   |
| 4         | 113.5  | 8220       | 2055     | 84.2     | 2717      | 13.4      | 115   |
| 5         | 120.4  | 9925       | 1985     | 85.9     | 2729      | 13        | 111   |
| 6         | 127.7  | 11425      | 1904     | 87.3     | 2732      | 12.7      | 106   |

Lago a nivel máximo - NAMO

| Nº Bombas | Hm (m) | Qtot (l/s) | Qu (l/s) | Rend (%) | Peje (kW) | NPSHr (m) | % BEP |
|-----------|--------|------------|----------|----------|-----------|-----------|-------|
| 1         | 90.2   | 2240       | 2240     | 78.3     | 2531      | 14.7      | 125   |
| 2         | 93.7   | 4450       | 2225     | 78.8     | 2595      | 14.6      | 124   |
| 3         | 98.8   | 6565       | 2188     | 80.2     | 2645      | 14.5      | 122   |
| 4         | 105.6  | 8520       | 2130     | 82.1     | 2688      | 14        | 119   |
| 5         | 113.2  | 10290      | 2058     | 84.2     | 2714      | 13.4      | 115   |
| 6         | 121.1  | 11870      | 1978     | 86       | 2733      | 13        | 111   |

Se presenta una evaluación cuantitativa de los 4 equipos a partir de las siguientes características con valores de 0 a 4 siendo 0 el más desfavorable y 4 el de mejor valor de evaluación. Por ejemplo en el caso de las respuestas inmediatas en caso de falla, se califico con cero la que no tiene respuesta inmediata y con cuatro a la que cuenta con dicha respuesta.

- 1) **Condiciones operativas:** Verificación y aseguramiento de las condiciones de operación solicitadas como gasto, carga dinámica total, gasto por equipo, curva del sistema, eficiencia del equipo de forma individual, acompañamiento en el arranque inicial y supervisión de las instalaciones, niveles de ruido.

En base a las curvas presentadas las bombas verticales no cumplen con los gastos de 2 metros cúbicos por segundo en el rango de las cargas dinámicas solicitadas. En este rubro la bomba sumergible es la única que cumple.

- 2) **Casos de Equipos Instalados Similares:** El fabricante debe especificar los lugares en México o en el extranjero donde se indiquen equipos instalados de la marca que sean similares a los cotizados y que se indiquen las características como potencia, gasto y carga a vencer para tener referencia si se han tenido problemas de operación.

La marca KBL no cuenta con referencias de equipos instalados en México y no presenta evidencia de algún otro punto similar. La marca Ruhrpumpen cuenta con instalaciones en Monterrey de los cuales las referencias investigadas no son confiables. La marca KSB es la que está instalada en Chapala actualmente y ha presentado algunos problemas en el cumplimiento de los datos de operación. La marca Indar cuenta con instalaciones en el Acueducto El Salto- La Red y no ha presentado problemas a la fecha.

- 3) **Tiempos de mantenimientos requeridos anuales y descripción de maniobras requeridas y si se cuenta con respuesta inmediata en caso de falla.** Se considerarán los tiempos requeridos en base a los manuales de operación de los equipos y deberá especificarse en la oferta técnica ubicación de talleres autorizados y tiempos de respuesta.

La marca KSB e Indar declaran contar con respuesta inmediata en caso de falla con talleres de servicio en el lugar de la estación de bombeo. Por otro lado, las bombas verticales requieren en promedio de 15 a 24 horas de mantenimiento anual con tiempos de desmontajes de 3 a 5 días para realizarlo, en el caso de sumergibles se requieren de 13 a 19 horas de mantenimiento cada cuatro años y con un tiempo de desmontaje de 8 horas.

- 4) **Planos de Instalación en la Infraestructura Actual:** El fabricante deberá entregar propuesta de instalación y los requerimientos para la instalación del equipo en las instalaciones de la Estación de Bombeo actual.

En el caso de las bombas verticales no se requieren modificaciones a la infraestructura actual, pero se requiere construir casa de máquina techada para las instalaciones. En el caso de la bomba sumergible si se requiere realizar obras de adecuación en el cárcamo, pero no se requiere casa de máquina.

- 5) **Costos de Inversión:** Se deben incluir los materiales y el equipo necesarios para la correcta operación como son los elementos de control de motores eléctricos como sensores de temperatura, humedad, vibración, fugas, y cualquier elemento de seguridad para garantizar una vida útil más prolongada.

En el caso de las bombas verticales se requieren variador de velocidad para que las bombas puedan entrar a las condiciones operativas requeridas y válvula de paso anular para la operación, esto puede impactar en el costo de operación por presentar pérdidas en la eficiencia del conjunto bomba motor. En el caso de la bomba sumergible ya se considera el costo total de la inversión. La marca KBL no incluye los costos del personal para la puesta en marcha y capacitación. El costo de inversión presentado por Ruhrpumpen en comparación al resto de las marcas parece ser insolvente.

- 6) **Aseguramiento de Calidad:** Características de los materiales de fabricación, pruebas realizadas en fábrica y si son presenciadas, garantías. Definir los materiales de las partes más importantes del equipo, pruebas realizadas a las mismas, esto con el fin de determinar la calidad de fabricación.

En este primer análisis solamente se considerará los tipos de pruebas realizadas a los equipos. En este rubro solamente Ruhrpumpen e Indar ofrecen pruebas del equipo en la fábrica y pueden ser presenciadas e incluidas en el costo.

- 7) **Tiempo de Entrega:** en semanas

El de mejor tiempo de entrega lo presenta la marca KSB con 36 semanas. La marca Indar queda en segundo lugar con 48 semanas y Ruhrpumpen con 51 semanas. KBL no indica esta información.



Los resultados de la evaluación realizada de manera cuantitativa en base a los elementos descritos se presentan en la Tabla 5.15 donde los mejores equipos evaluados resultaron ser la marca KSB y la marca Indar.

*Tabla 5.15 Resumen de Evaluación Cuantitativa de Equipos de Bombeo*

|  Turbina Vertical<br> Sumergible | <br>Tipo de Bomba<br>Turbina Vertical | <br>Tipo de Bomba<br>Turbina Vertical |  KBL<br><br>Tipo de Bomba<br>Turbina Vertical | <br>Tipo de Bomba<br>Sumergible |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Configuración para 10 m <sup>3</sup> /seg<br>Caudal por equipo                                                                                                                                     | 4 Bombas + 1 Reserva<br>2.0 m <sup>3</sup> /seg                                                                        | 4 Bombas + 1 Reserva<br>2.0 m <sup>3</sup> /seg                                                                        | 4 Bombas + 1 Reserva<br>2.0 m <sup>3</sup> /seg                                                                                 | 4 Bombas + 1 Reserva<br>2.0 m <sup>3</sup> /seg                                                                    |
| Condiciones Operativas                                                                                                                                                                             | 3                                                                                                                      | 2                                                                                                                      | 2                                                                                                                               | 4                                                                                                                  |
| Casos de Equipos Instalados sin problemas operativos                                                                                                                                               | 2                                                                                                                      | 3                                                                                                                      | 0                                                                                                                               | 4                                                                                                                  |
| Tiempo de Respuesta Inmediata                                                                                                                                                                      | 0                                                                                                                      | 4                                                                                                                      | 0                                                                                                                               | 4                                                                                                                  |
| Requerimiento de Mantenimiento                                                                                                                                                                     | 2                                                                                                                      | 2                                                                                                                      | 2                                                                                                                               | 4                                                                                                                  |
| Requerimientos de Instalación                                                                                                                                                                      | 2                                                                                                                      | 2                                                                                                                      | 2                                                                                                                               | 2                                                                                                                  |
| Costos de Inversión                                                                                                                                                                                | 4                                                                                                                      | 3                                                                                                                      | 1                                                                                                                               | 2                                                                                                                  |
| Aseguramiento de Calidad                                                                                                                                                                           | 4                                                                                                                      | 1                                                                                                                      | 1                                                                                                                               | 4                                                                                                                  |
| Tiempo de Entrega (Semanas)                                                                                                                                                                        | 2                                                                                                                      | 4                                                                                                                      | 0                                                                                                                               | 3                                                                                                                  |
| Suma Puntos                                                                                                                                                                                        | 19                                                                                                                     | 21                                                                                                                     | 8                                                                                                                               | 23                                                                                                                 |

De estos dos tipos de bombas se realizó una segunda evaluación a partir de una matriz técnica comparativa y posteriormente un cálculo de costos para definir cuál es la mejor alternativa para la Estación de Bombeo Chapala. En la Tabla 5.16 se muestra los valores.

*Tabla 5.16 Matriz Técnica Comparativa Equipos de Bombeo*

| MATRIZ TÉCNICA COMPARATIVA                     |                             |                             |                                                                                                                                                   |
|------------------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Criterio técnico                               | Bombas Sumergibles INDAR    | Bombas Verticales KSB       | Comentarios                                                                                                                                       |
| Número de equipos                              | 4+1                         | 4+1                         | Las bombas KSB requieren operar los 5 equipos para después meterlos en curva mediante VDF                                                         |
| Carga dinámica total                           | 119 metros                  | 132 metros                  | Las bombas KSB están sobredimensionadas.                                                                                                          |
| Caudal por bomba                               | 2,000 litros por segundo    | 2,000 litros por segundo    |                                                                                                                                                   |
| Velocidad de giro (rpm)                        | 882 revoluciones por minuto | 715 revoluciones por minuto | 715 RPM, (a menor velocidad menor NPSH r)                                                                                                         |
| Eficiencia hidráulica en el punto de operación | 85.6%                       | 83%                         | 83% (En la bomba KSB se deben de considerar las pérdidas mecánicas por transmisión en flechas y chumaceras y pérdidas hidráulicas en chumaceras y |

|                                                                         |                                                                                                                                                                                                                             |                                                                                         |                                                                                                                                                                                                            |
|-------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                         |                                                                                                                                                                                                                             |                                                                                         | flecha o cubre flecha, lo cual reduce la eficiencia)                                                                                                                                                       |
| <b>Elementos que afectan la eficiencia global del sistema de bombeo</b> | Conjunto bomba/motor                                                                                                                                                                                                        | Motor, Bomba, VDF, pérdidas mecánicas e hidráulicas, sistemas de lubricación.           | Los sistemas auxiliares que requiere la bomba vertical afectan directamente su eficiencia                                                                                                                  |
| <b>Cálculo de la eficiencia global del sistema de bombeo</b>            | $\eta_{mb} = \eta_h * \eta_e = \eta_h * \eta_m * \eta_v$<br>$\eta_{mb}$ = rendimiento conjunto motobomba $\eta_h$ = Rendimiento hidráulico<br>$\eta_m$ = Rendimiento motor<br>$\eta_v$ = Rendimiento variador de frecuencia |                                                                                         | La bomba sumergible tiene mejor eficiencia<br><br>La bomba vertical todavía hace falta restarle a la eficiencia las perdidas mecánicas e hidráulicas y los consumos por los sistemas de lubricación.       |
|                                                                         | $\eta_{mb} = 0,859 * 0,915 = 0,785985.$                                                                                                                                                                                     | $\eta_{mb} = 0,83 * 0,956 * 0,96 = 0,76174$                                             |                                                                                                                                                                                                            |
| <b>Potencia requerida</b>                                               | 3,660 HP                                                                                                                                                                                                                    | 4,342 HP                                                                                | La bomba sumergible requiere menor potencia consumida para operación.                                                                                                                                      |
| <b>NPSH r en el punto de operación</b>                                  | 13.1 metros                                                                                                                                                                                                                 | -                                                                                       | Bomba vertical requiere menor carga neta por ser más lenta                                                                                                                                                 |
| <b>Sumergencia</b>                                                      | 15.8 metros                                                                                                                                                                                                                 | -                                                                                       | Bomba sumergible requiere mayor sumergencia para evitar cavitación.                                                                                                                                        |
| <b>Diámetro de descarga</b>                                             | 32"                                                                                                                                                                                                                         | -                                                                                       | Bomba sumergible menor requerimiento de diámetro                                                                                                                                                           |
| <b>Fluido a manejar</b>                                                 | Agua cruda.                                                                                                                                                                                                                 | Agua cruda.                                                                             | Igual                                                                                                                                                                                                      |
| <b>Tipo de impulsor.</b>                                                | Cerrado                                                                                                                                                                                                                     | -                                                                                       |                                                                                                                                                                                                            |
| <b>Tipo de difusor.</b>                                                 | Tazón                                                                                                                                                                                                                       | Campana/tazón                                                                           |                                                                                                                                                                                                            |
| <b>Tiempo de arranque</b>                                               | Instantáneo                                                                                                                                                                                                                 | Indefinido                                                                              | Las bombas sumergibles NO requieren de VDF, ni estrangulamiento por válvula, ni sistemas de lubricación externa. En cambio, la vertical requiere la coordinación de todos esos elementos para su arranque. |
| <b>Accesorios para montaje.</b>                                         | Placa base, codo de descarga y tubería de descarga.                                                                                                                                                                         | Tubería de columna, placa base, cabezal de descarga, flecha, separadores y centradores. | La bomba Indar se instala igual que una bomba de pozo                                                                                                                                                      |

|                                       |                                                                                                                                                |                                                                                                                                         |                                                                                                                                                           |
|---------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Tiempo de montaje y desmontaje</b> | 8 horas                                                                                                                                        | 40 horas                                                                                                                                | Las maniobras de bombas verticales son muy tardadas por el número de componentes mecánicos, además del riesgo de falla alto por errores en la alineación. |
| <b>Actividades de mantenimiento.</b>  | Monitoreo de parámetros eléctricos e hidráulicos                                                                                               | Mantenimiento bomba, motor, VDF, A/C y sistemas de lubricación.                                                                         | En el caso de bombas verticales si el VDF requiere mantenimiento la bomba queda también fuera de servicio                                                 |
| <b>Exposición a corrosión</b>         | Motor, bomba y cables sumergidos                                                                                                               | Bomba, columna, y anillos de ajuste.                                                                                                    | La bomba vertical es susceptible a más desgaste por tener más partes móviles                                                                              |
| <b>Disponibilidad operativa</b>       | Operación más fácil, estable y continua. En caso de falla el desmontaje del equipo es muy rápido y la sustitución de refacciones es muy fácil. | Operación compleja por todos los sistemas auxiliares, en caso de falla, la bomba tardaría varias semanas en estar de vuelta en servicio |                                                                                                                                                           |
| <b>Vida útil esperada</b>             | + 20 años                                                                                                                                      | +20 años                                                                                                                                |                                                                                                                                                           |
| <b>Riesgos de falla</b>               | Sellos mecánicos del motor                                                                                                                     | Cojinetes, flechas, alineación, todos los componentes del VDF, sistemas auxiliares de lubricación. Sistemas de refrigeración de los VDF | Las bombas verticales corren mucho riesgo de falla al depender de múltiples sistemas auxiliares.                                                          |
| <b>Flexibilidad de operación.</b>     | Se puede operar desde una sola bomba o hasta las 5 en paralelo sin necesidad de elementos auxiliares.                                          | Solo pueden operar con las 5 bombas a la vez y conectadas cada una a un VDF                                                             | La flexibilidad en las verticales depende del VDF.                                                                                                        |
| <b>Costo a largo plazo</b>            | Bajos costos de operación y mantenimiento.                                                                                                     | Mayor consumo de energía y mayor costo de mantenimiento.                                                                                | El costo de operación es más elevado debido a los mantenimientos de todos los sistemas auxiliares y a que la eficiencia es menor.                         |

Adicionalmente a los datos mostrados en la matriz técnica comparativa se hará el análisis de ciclo de vida considera los siguientes aspectos:

**Gasto de Capital** es decir el costo de los equipos que se utilizarán a largo plazo incluyendo la construcción de edificios o instalaciones.

Sumergibles: mayor obra civil en el cárcamo pero no requiere casa de máquinas, menor costo equipo eléctrico.

Verticales: no se requiere costo en adecuación de cárcamo pero requiere casa de máquina techada, mayor costo equipo eléctrico.

**Gastos operativos** es decir los costos de energía eléctrica y mantenimiento de equipos.

Sumergibles: menor consumo energético anual y costos por mantenimiento nulos.

Verticales: mantenimientos constantes, necesidad de sistemas auxiliares, consumo eléctrico mayor.

#### Confiabilidad:

Sumergibles: operación estable, eficiente y controlada.

Verticales: alto riesgo de falla por depender de la operación con VDF (cero redundancia).

#### Horizonte a 20 años:

Se considera en ambos casos la misma vida útil. Los datos técnicos con los que se realiza el cálculo se muestran en la Tabla 5.17.

*Tabla 5.17 Datos técnicos de los Equipos de Bombeo*

| TIPO       | MARCA | MODELO         | CDT | CAUDAL | EFICIENCIA  | VELOCIDAD | POTENCIA  | POTENCIA  | ENERGIA |
|------------|-------|----------------|-----|--------|-------------|-----------|-----------|-----------|---------|
| BOMBA      |       |                |     | LPS    | BOMBA-MOTOR |           | REQUERIDA | INSTALADA | ENERGIA |
| UNIDADES   |       |                | M   |        | %           | RPM       | HP        | HP        | KW      |
| SUMERGIBLE | INDAR | UGP-4810       | 120 | 2000   | 0.7859      | 882       | 3660      | 3855      | 2729.26 |
| VERTICAL   | KSB   | SEZ 800-1010/2 | 132 | 2000   | 0.7617      | 720       | 4342      | 5000      | 3237.83 |

En la Tabla 5.18 se muestran los costos de inversión y de operación los cuales se calcularon de manera anualizada.

*Tabla 5.18 Costos de Inversión y Operación Equipos de Bombeo*

| MODELO         | COSTO             | %    | COSTO            | COSTO           | COSTO            | COSTO   | COSTO             | COSTO | COSTO            |
|----------------|-------------------|------|------------------|-----------------|------------------|---------|-------------------|-------|------------------|
| BOMBA          | BOMBA-MOTOR       | MANT | MANTENIMIENTO    | O. CIVIL        | O. CIVIL         | KWR     | BOMBEO            | ANUAL | INVERSION        |
| UNIDADES       | TOTALES           |      | ANUAL            | CARCAMO         | C. MAQ           |         | ANUAL             |       | ANUAL            |
| UGP-4810       | \$ 706,544,400.00 | 3%   | \$ 21,196,332.00 | \$ 8,750,000.00 | \$ -             | \$ 1.56 | \$ 89,656,256.70  | 0.12  | \$ 85,835,328.00 |
| SEZ 800-1010/2 | \$ 676,106,000.00 | 10%  | \$ 67,610,600.00 | \$ -            | \$ 19,870,000.00 | \$ 1.56 | \$ 106,362,695.79 | 0.12  | \$ 83,517,120.00 |



Con base en las condiciones del proyecto, el tipo de fluido, la importancia de la continuidad operativa y el horizonte de operación esperado, la alternativa de **bombas sumergibles** representa la solución más eficiente, confiable y económica a largo del horizonte del proyecto.

### 5.2.5. Criterios de Diseño.

Para obtener un adecuado diseño hidráulico tanto de la línea de bombeo como la de gravedad, se siguió la metodología establecida en los libros 10 y 11 del Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento (MAPAS, 2015).

Es necesario que, al momento de trazar la línea piezométrica resultante en el perfil del terreno, ésta no cruce el terreno natural a lo largo de la conducción, que aritméticamente corresponde a presiones negativas en ciertos puntos de la conducción. Presiones negativas en el flujo de agua son posibles hasta cierto límite, igual a la presión absoluta de vapor saturado del agua, por lo que si el valor obtenido es inferior a esa presión la interpretación física es que el gasto que pasará por la línea será menor al requerido.

Para el diseño de la línea a gravedad se buscó una combinación de diámetros que permita utilizar el desnivel topográfico para efectuar la conducción, logrando de esta manera un diseño hidráulico correcto. Es decir, encontrar el diámetro de tubo necesario que permita transportar el gasto de diseño sobre una topografía que proporcione un desnivel favorable hacia el punto de descarga. En este tipo de conducción se tiene un desnivel disponible dado entre las cargas hidráulicas existentes en el inicio (en la fuente) y el final (la descarga) de la conducción.

De esta manera el diseño de la línea de conducción se dividió en los siguientes apartados:

- Diseño en régimen permanente
- Revisión del fenómeno transitorio
- Verificación de la envolvente de resistencia de tubería propuesta
- Ajuste, en caso de ser necesario, de la clase de tubería para que la envolvente de resistencia cubra las presiones a las que estará sometida la tubería.

Otro punto para considerar durante la definición de los diámetros en la línea de conducción es que el rango de velocidades a las que estará sometida la tubería se encuentre dentro del rango permisible de acuerdo con el tipo de tubería. En el libro de Datos Básicos de MAPAS se indican las velocidades admisibles para diferentes materiales de tubería, que son la velocidad mínima para evitar la precipitación de partículas que arrastre el agua y la velocidad máxima que no ocasiona erosión en las paredes de las tuberías, siendo la velocidad mínima igual a 0.30 m/s para todos los materiales y la velocidad máxima de 3 a 5 m/s según el tipo de material.

### Velocidades permisibles

Las velocidades permisibles del líquido en un conducto están gobernadas por las características del material del conducto y la magnitud de los fenómenos transitorios. Existen límites tanto inferiores como superiores. La velocidad mínima de escurrimiento se fija, para evitar la precipitación de partículas de arrastre en el agua.

La velocidad máxima será aquella con la cual no deberá ocasionarse erosión en las paredes de las tuberías. En la tabla 5.19 se presentan valores de estas velocidades para diferentes materiales de tubería. Las velocidades permisibles en la tubería seleccionada se encuentran entre 0.30 m/s (como velocidad mínima) y 5.00 m/s como velocidad máxima.



*Tabla 5.19 Velocidades permisibles (MAPAS, 2015)*

| Material de la tubería                            | Velocidad (m/s) |        |
|---------------------------------------------------|-----------------|--------|
|                                                   | Máxima          | Mínima |
| Concreto simple hasta 45 cm de diámetro           | 3.00            | 0.30   |
| Concreto reforzado de 60 cm de diámetro o mayores | 3.50            | 0.30   |
| Concreto presforzado                              | 3.50            | 0.30   |
| Acero con revestimiento                           | 5.00            | 0.30   |
| Acero sin revestimiento                           | 5.00            | 0.30   |
| Acero galvanizado                                 | 5.00            | 0.30   |
| Asbesto cemento                                   | 5.00            | 0.30   |
| Fierro fundido                                    | 5.00            | 0.30   |
| Hierro dúctil                                     | 5.00            | 0.30   |
| Polietileno de alta densidad                      | 5.00            | 0.30   |
| PVC (policloruro de vinilo)                       | 5.00            | 0.30   |

Nota: Las velocidades altas incrementan la magnitud de los fenómenos transitorios. La velocidad máxima en la tabla ha sido establecida considerando que se han resuelto los problemas asociados a fenómenos transitorios. En el libro "Fenómenos transitorios en líneas de conducción" se explican más detalladamente los estudios correspondientes.

## Presiones máximas admisibles

La presión máxima admisible en la tubería está relacionada con la clase de la tubería seleccionada, en el caso del acueducto se seleccionó la clase de la tubería en función de los resultados del cálculo hidráulico y de la disponibilidad comercial según el tipo de material seleccionado para la tubería.

## Trazo de la tubería

Se realizó el trazo de la tubería considerando las deflexiones máximas permisibles por el tipo de tubería y una profundidad promedio de zanja de 4.50 metros, con el propósito de proteger la tubería a lo largo del trazo propuesto y reducir la probabilidad de extracciones clandestinas. En el tramo de gravedad la profundidad propuesta es cercana a los 6 metros debido los cruces con infraestructura existente.

### 5.2.6. Propiedades de la tubería

#### Presión resistente

La presión resistente de la tubería de acero al carbón ASTM A-53 se calcula de acuerdo con el espesor de la tubería aplicando la fórmula de Barlow: Acero ASTM A-53

$$P(Mpa) = \frac{2Se}{D}$$

Donde:

$P(Mpa)$  Presión resistente en Mpa

$S$  Límite elástico en Mpa

$e$  Espesor de pared en mm

$D$  Diámetro externo en mm

Los espesores disponibles para la tubería de acero al carbón ASTM A-53 de 106 pulgadas de diámetro son de tres cuartos de pulgada y de cinco octavos de pulgada.

Los valores de las propiedades mecánicas en esta tubería se muestran en la Tabla 5.20 donde se identifica que la tubería de 106 pulgadas y espesor de 5/8 de pulgada la presión interna es de 14.64 kilogramos por centímetro cuadrado. En el caso de espesores de tres cuartos de pulgada la presión interna admisible será de 17.57 kilogramos por centímetro cuadrado.

*Tabla 5.20 Propiedades mecánicas de la tubería de acero propuesta*

| <b>PRESION INTERNA ADMISIBLE TUBERIA ACERO CON COSTURA HELICOLIDAL</b> |              |                          |               |                           |
|------------------------------------------------------------------------|--------------|--------------------------|---------------|---------------------------|
| S                                                                      | 2482.76      | kg                       | 36000         | lb/plg <sup>2</sup>       |
| t                                                                      | 1.5875       | cm                       | <b>5/8</b>    | plg                       |
| D                                                                      | 269.24       | cm                       | 106           | plg                       |
| FS                                                                     | 2            |                          | 2             |                           |
| <b>P</b>                                                               | <b>14.64</b> | <b>kg/cm<sup>2</sup></b> | <b>212.26</b> | <b>lb/plg<sup>2</sup></b> |
| S                                                                      | 2482.75862   | kg                       | 36000         | lb/plg <sup>2</sup>       |
| t                                                                      | 1.905        | cm                       | <b>3/4</b>    | plg                       |
| D                                                                      | 269.24       | cm                       | 106           | plg                       |
| FS                                                                     | 2            |                          | 2             |                           |
| <b>P</b>                                                               | <b>17.57</b> | <b>kg/cm<sup>2</sup></b> | <b>254.72</b> | <b>lb/plg<sup>2</sup></b> |





La ecuación de conservación de masa (continuidad) es:

$$V_1 A_1 = V_2 A_2$$

donde:

$V_1$  = Velocidad en la sección 1 (m/s)

$A_1$  = Área transversal de la sección 1 (m<sup>2</sup>)

$V_2$  = Velocidad en la sección 2 (m/s)

$A_2$  = Área transversal de la sección 2 (m<sup>2</sup>)

Ecuación de conservación de energía:

$$E_1 = E_2 + H_t$$

$$\left(z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g}\right) - \left(z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g}\right) = H_t$$

Donde:

$z_1, z_2$  = Elevación de la conducción en las secciones 1 y 2 (m)

$p_1, p_2$  = Presión interna en las secciones 1 y 2 (N/m<sup>2</sup>)

$H_t$  = Pérdidas de energía (m)

La dimensión física de estos elementos no es energía sino longitud. Lo anterior se debe a que durante la deducción de esta ecuación se ha expresado la energía por unidad de peso.

$H_t$  representa la pérdida de energía por unidad de peso entre las secciones 1 y 2 y está constituida por las pérdidas por fricción  $h_f$  (pérdidas primarias o mayores) y las pérdidas locales  $h_L$  (pérdidas por accesorios, secundarias o menores).

$$H_t = h_f + h_L$$

Donde:

$h_f$  = Pérdidas por fricción (pérdidas mayores).

$h_L$  = Pérdidas locales (pérdidas menores).

Las pérdidas por fricción se deben al rozamiento de las partículas fluidas entre sí y entre éstas y el contorno sólido que las contiene, mientras que las pérdidas locales obedecen básicamente accesorios y cambios de dirección.

## Pérdidas por fricción

La pérdida de carga en una tubería es la pérdida de presión que se produce en un fluido debido a la fricción de las partículas del fluido entre sí y contra las paredes de la tubería que las conduce.

En la ecuación conocida como ecuación de Darcy-Weisbach, se requiere conocer un factor  $f'$ , llamado factor de fricción, el cual es una variable adimensional y depende tanto del número de Reynolds ( $Re$ , el cual a su vez es un factor adimensional que relaciona las fuerzas dinámicas del fluido), y la rugosidad relativa de la tubería ( $\epsilon/D$ ), la cual es un indicador de las imperfecciones del material de la misma tubería.

La expresión de la fórmula de **Darcy-Weisbach** es la siguiente:

$$h_f = f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g}$$

Donde:

$h_f$  = pérdida de energía por fricción, en m

$f$  = coeficiente de fricción (adimensional)

$L$  = longitud de la tubería, en m

$D$  = diámetro interno de la tubería, en m

$V$  = velocidad media de flujo, en m/s

$Re$  = Número de Reynolds (adimensional)

$g$  = Aceleración de la gravedad (9.82 m/seg<sup>2</sup>)

$\varepsilon$  = Rugosidad absoluta (mm)

Flujo laminar (Hagen–Poiseuille). Régimen laminar ( $Re < 2,300$ ), donde  $Re$  es el número de Reynolds, el factor de fricción se calcula como:

$$f_{laminar} = \frac{64}{Re}$$

Flujo de transición ( $2.000 < Re < 4.000$ ) Se aplica una interpolación cúbica al diagrama de Moody (Dunlop, 1991)

Flujo Turbulento (Colebrook-White). Vale para tubos lisos o rugosos en zona de transición o turbulenta y  $Re > 4,000$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left( \frac{\varepsilon/D}{3.71} + \frac{2.51}{Re \sqrt{f}} \right)$$

Para este caso particular que se utilizará tubería de Acero ASTM A-53 se tomará un valor para la rugosidad absoluta de 0.10 mm Este valor corresponde a los datos de la Tabla 5.21 donde se indican las rugosidades para varios materiales. Cabe mencionar que este valor es para tubería nueva. Es importante mencionar que para este caso en particular se cuenta con información de mediciones del comportamiento del acueducto actual y que en base a dichos datos proporcionados por el DR. Rafael Carmona sugiere el uso de factores de fricción de 0.015 para condición de tubería nueva y de 0.020 para condiciones de tubería usada.



*Tabla 5.21 Rugosidades absolutas en algunos materiales (Sotelo, 2002)*

| Material                                                                                                                                                                                 | $\epsilon$ (mm) |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|
| <b>Tubos lisos</b>                                                                                                                                                                       |                 |
| Vidrio, cobre, latón, madera (bien cepillada), acero nuevo soldado y con una mano interior de pintura; tubos de acero de precisión sin costura, serpentines industriales, plástico, hule | 0.0015          |
| Tubos industriales de latón                                                                                                                                                              | 0.025           |
| Tubos de madera                                                                                                                                                                          | 0.2 a 1         |
| Fierro forjado                                                                                                                                                                           | 0.05            |
| Fierro fundido nuevo                                                                                                                                                                     | 0.25            |
| Fierro fundido, con protección interior de asfalto                                                                                                                                       | 0.12            |
| Fierro fundido oxidado                                                                                                                                                                   | 1 a 1.5         |
| Fierro fundido, con incrustaciones                                                                                                                                                       | 1.5 a 3         |
| Fierro fundido, centrifugado                                                                                                                                                             | 0.05            |
| Fierro fundido nuevo, con bridas o juntas de macho y campana                                                                                                                             | 0.15 a 0.3      |
| Fierro fundido usado, con bridas o juntas de macho y campana                                                                                                                             | 2 a 3.5         |
| Fierro fundido para agua potable con bastantes incrustaciones y diámetro de 50 a 125 mm.                                                                                                 | 1 a 4           |
| Fierro galvanizado                                                                                                                                                                       | 0.15            |
| Acero rolado, nuevo                                                                                                                                                                      | 0.04 a 0.1      |
| Acero laminado, nuevo                                                                                                                                                                    | 0.05            |
| Acero laminado con protección interior de asfalto                                                                                                                                        | 0.05            |
| <b>Tubos de acero de calidad normal</b>                                                                                                                                                  |                 |
| Nuevo                                                                                                                                                                                    | 0.05 a 0.1      |
| Limpiado después de mucho uso                                                                                                                                                            | 0.15 a 0.20     |
| Moderadamente oxidado, con pocas incrustaciones                                                                                                                                          | 0.4             |
| Con muchas incrustaciones                                                                                                                                                                | 3               |
| Con remaches transversales, en buen estado                                                                                                                                               | 0.1             |
| Con costura longitudinal y una línea transversal de remaches en cada junta, o bien laqueado interiormente                                                                                | 0.3 a 0.4       |
| Acero soldado, con líneas transversales de remaches, sencilla o doble; o tubos remachados con doble hilera longitudinal de remaches e hilera transversal sencilla, sin incrustaciones    | 0.6 a 0.7       |
| Acero soldado, con una hilera transversal sencilla de pernos en cada junta, laqueado interior, sin oxidaciones, con circulación de agua turbia                                           | 1               |
| Acero soldado, con doble hilera transversal de pernos, agua turbia, tuberías remachadas con doble costura longitudinal de remaches y transversal sencilla, interior asfaltado o laqueado | 1.2 a 1.3       |
| Acero soldado, con costura doble de remaches transversales, muy oxidado.                                                                                                                 |                 |
| Acero remachado, de cuatro a seis filas longitudinales de remaches, con mucho tiempo de servicio                                                                                         | 2               |
| Tubos remachados, con filas longitudinales y transversales                                                                                                                               |                 |
| a) Espesor de lámina < 5 mm                                                                                                                                                              | 0.65            |
| b) Espesor de lámina de 5 a 12 mm                                                                                                                                                        | 1.95            |
| c) Espesor de lámina > 12 mm, o entre 6 y 12 mm, si las hileras de pernos tienen cubrejuntas                                                                                             |                 |
| d) Espesor de lámina > 12 mm con cubrejuntas                                                                                                                                             | 3               |
| Tubos remachados, con cuatro filas transversales y seis longitudinales con cubrejuntas interiores                                                                                        | 4               |
| <b>No metálicos</b>                                                                                                                                                                      |                 |
| Asbesto-cemento nuevo                                                                                                                                                                    | 0.025           |
| Asbesto-cemento, con protección interior de asfalto                                                                                                                                      | 0.0015          |

## Pérdidas locales

Las pérdidas locales dependen de dos parámetros: la velocidad con la que circula el fluido y el elemento puntual en cuestión que cause la pérdida (por su coeficiente  $K$ ), así para el cálculo de las pérdidas locales la expresión que se utiliza es la siguiente:

$$h_L = K \frac{V^2}{2g}$$

Donde:

$h_L$  Pérdida local (m)

$K$  Coeficiente de perdidas locales

$V$  Velocidad del flujo en la tubería (m/s)

$g$  Intensidad del campo gravitatorio de la Tierra (m/s)

Los valores de los coeficientes  $K$  para cada tipo de accesorio se muestran en la Tabla 5.22 así como en las Figura 5.8 se determinan los valores para los cambios de dirección.





*Tabla 5.22 Valores del coeficiente  $k$  por tipo de accesorio (Sotelo)*

| Elemento                                            | Coeficiente $k$ |
|-----------------------------------------------------|-----------------|
| <b>Válvulas</b>                                     |                 |
| Válvula de globo, completamente abierta             | 10.00           |
| Válvula en ángulo, completamente abierta            | 5.00            |
| Válvula check completamente abierta                 | 2.50            |
| Válvula de compuerta, completamente abierta         | 0.20            |
| Válvula de compuerta, con $\frac{1}{4}$ de apertura | 1 a 1.15        |
| Válvula de compuerta, con $\frac{1}{2}$ de apertura | 5.60            |
| Válvula de compuerta, con $\frac{3}{4}$ de apertura | 24.00           |
| <b>Accesorios</b>                                   |                 |
| Codo de radio corto ( $r / d = \pm 1$ )             | 0.90            |
| Codo de radio mediano                               | 0.75 a 0.80     |
| Codo de gran radio ( $r / d = \pm 1.5$ )            | 0.60            |
| Codo de 45°                                         | 0.4 a 0.42      |
| Retorno (curva en U)                                | 2.20            |
| Tee en sentido recto                                | 0.30            |
| Tee a través de la salida lateral                   | 1.80            |
| Unión                                               | 0.30            |
| Ye de 45°, en sentido recto                         | 0.30            |
| Ye de 45°, salida lateral                           | 0.80            |
| Entrada recta a tope                                | 0.50            |
| Entrada con boca acampanada                         | 0.10            |
| Entrada con tubo reentrante                         | 0.90            |
| Salida                                              | 1.00            |
| <b>Depósito a tubería (pérdida a la entrada)</b>    |                 |
| Conexión a ras de la pared                          | 0.50            |
| Tubería entrante                                    | 1.00            |
| Conexión abocinada                                  | 0.05            |
| De tubería a depósito (pérdida a la salida)         | 1.00            |
| Contracción brusca (ver Tabla 3.3)                  | $k_c$           |
| <b>Codos y tees</b>                                 |                 |
| Codo de 45°                                         | 0.35 – 0.45     |
| Codo de 90°                                         | 0.50 – 0.75     |
| Tees                                                | 1.50 – 2.00     |



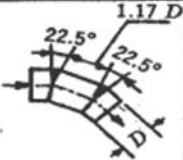
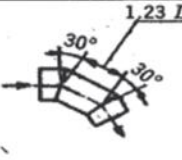
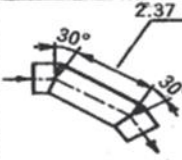
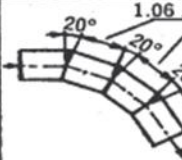
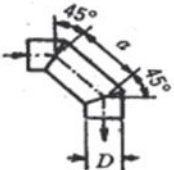
| <br>$K_s = 0.016$<br>$K_r = 0.024$ | <br>$K_s = 0.034$<br>$K_r = 0.044$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | <br>$K_s = 0.042$<br>$K_r = 0.062$ | <br>$K_s = 0.066$<br>$K_r = 0.154$ |       |      |       |       |       |       |       |       |       |       |      |       |       |       |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |    |       |       |       |       |       |      |       |       |       |   |       |      |       |       |      |       |       |       |       |       |       |       |   |      |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|-------|------|-------|-------|------|-------|-------|------|-------|-------|------|-------|-------|------|-------|-------|------|-------|-------|-----------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|---|-------|------|-------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---|------|-------|-------|------|-------|-------|------|-------|-------|------|-------|-------|
| <br>$K_s = 0.112$<br>$K_r = 0.284$ | <br>$K_s = 0.150$<br>$K_r = 0.268$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | <br>$K_s = 0.143$<br>$K_r = 0.227$ | <br>$K_s = 0.108$<br>$K_r = 0.236$ |       |      |       |       |       |       |       |       |       |       |      |       |       |       |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |    |       |       |       |       |       |      |       |       |       |   |       |      |       |       |      |       |       |       |       |       |       |       |   |      |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |
|                                    | <table><tr><th>%D</th><th><math>K_s</math></th><th><math>K_r</math></th></tr><tr><td>0.71</td><td>0.507</td><td>0.510</td></tr><tr><td>0.943</td><td>0.350</td><td>0.415</td></tr><tr><td>1.174</td><td>0.333</td><td>0.384</td></tr><tr><td>1.42</td><td>0.261</td><td>0.377</td></tr><tr><td>1.50*</td><td>0.280</td><td>0.376</td></tr><tr><td>1.86</td><td>0.289</td><td>0.390</td></tr><tr><td>2.56</td><td>0.356</td><td>0.429</td></tr><tr><td>3.14</td><td>0.346</td><td>0.426</td></tr><tr><td>3.72</td><td>0.356</td><td>0.460</td></tr><tr><td>4.89</td><td>0.389</td><td>0.455</td></tr><tr><td>5.59</td><td>0.392</td><td>0.444</td></tr><tr><td>6.28</td><td>0.399</td><td>0.444</td></tr></table> | %D                                                                                                                  | $K_s$                                                                                                                 | $K_r$ | 0.71 | 0.507 | 0.510 | 0.943 | 0.350 | 0.415 | 1.174 | 0.333 | 0.384 | 1.42 | 0.261 | 0.377 | 1.50* | 0.280 | 0.376 | 1.86 | 0.289 | 0.390 | 2.56 | 0.356 | 0.429 | 3.14 | 0.346 | 0.426 | 3.72 | 0.356 | 0.460 | 4.89 | 0.389 | 0.455 | 5.59 | 0.392 | 0.444 | 6.28 | 0.399 | 0.444 |  | <table><tr><th>%D</th><th><math>K_s</math></th><th><math>K_r</math></th></tr><tr><td>1.186</td><td>0.120</td><td>0.294</td></tr><tr><td>1.40</td><td>0.125</td><td>0.252</td></tr><tr><td>1.50*</td><td>—</td><td>0.260</td></tr><tr><td>1.63</td><td>0.124</td><td>0.266</td></tr><tr><td>1.86</td><td>0.117</td><td>0.272</td></tr><tr><td>2.325</td><td>0.096</td><td>0.317</td></tr><tr><td>2.40*</td><td>0.095</td><td>—</td></tr><tr><td>2.91</td><td>0.108</td><td>0.317</td></tr><tr><td>3.49</td><td>0.130</td><td>0.318</td></tr><tr><td>4.65</td><td>0.148</td><td>0.310</td></tr><tr><td>6.05</td><td>0.142</td><td>0.313</td></tr></table> | %D | $K_s$ | $K_r$ | 1.186 | 0.120 | 0.294 | 1.40 | 0.125 | 0.252 | 1.50* | — | 0.260 | 1.63 | 0.124 | 0.266 | 1.86 | 0.117 | 0.272 | 2.325 | 0.096 | 0.317 | 2.40* | 0.095 | — | 2.91 | 0.108 | 0.317 | 3.49 | 0.130 | 0.318 | 4.65 | 0.148 | 0.310 | 6.05 | 0.142 | 0.313 |
| %D                                                                                                                  | $K_s$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | $K_r$                                                                                                               |                                                                                                                       |       |      |       |       |       |       |       |       |       |       |      |       |       |       |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |    |       |       |       |       |       |      |       |       |       |   |       |      |       |       |      |       |       |       |       |       |       |       |   |      |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |
| 0.71                                                                                                                | 0.507                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 0.510                                                                                                               |                                                                                                                       |       |      |       |       |       |       |       |       |       |       |      |       |       |       |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |    |       |       |       |       |       |      |       |       |       |   |       |      |       |       |      |       |       |       |       |       |       |       |   |      |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |
| 0.943                                                                                                               | 0.350                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 0.415                                                                                                               |                                                                                                                       |       |      |       |       |       |       |       |       |       |       |      |       |       |       |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |    |       |       |       |       |       |      |       |       |       |   |       |      |       |       |      |       |       |       |       |       |       |       |   |      |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |
| 1.174                                                                                                               | 0.333                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 0.384                                                                                                               |                                                                                                                       |       |      |       |       |       |       |       |       |       |       |      |       |       |       |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |    |       |       |       |       |       |      |       |       |       |   |       |      |       |       |      |       |       |       |       |       |       |       |   |      |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |
| 1.42                                                                                                                | 0.261                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 0.377                                                                                                               |                                                                                                                       |       |      |       |       |       |       |       |       |       |       |      |       |       |       |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |    |       |       |       |       |       |      |       |       |       |   |       |      |       |       |      |       |       |       |       |       |       |       |   |      |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |
| 1.50*                                                                                                               | 0.280                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 0.376                                                                                                               |                                                                                                                       |       |      |       |       |       |       |       |       |       |       |      |       |       |       |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |    |       |       |       |       |       |      |       |       |       |   |       |      |       |       |      |       |       |       |       |       |       |       |   |      |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |
| 1.86                                                                                                                | 0.289                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 0.390                                                                                                               |                                                                                                                       |       |      |       |       |       |       |       |       |       |       |      |       |       |       |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |    |       |       |       |       |       |      |       |       |       |   |       |      |       |       |      |       |       |       |       |       |       |       |   |      |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |
| 2.56                                                                                                                | 0.356                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 0.429                                                                                                               |                                                                                                                       |       |      |       |       |       |       |       |       |       |       |      |       |       |       |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |    |       |       |       |       |       |      |       |       |       |   |       |      |       |       |      |       |       |       |       |       |       |       |   |      |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |
| 3.14                                                                                                                | 0.346                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 0.426                                                                                                               |                                                                                                                       |       |      |       |       |       |       |       |       |       |       |      |       |       |       |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |    |       |       |       |       |       |      |       |       |       |   |       |      |       |       |      |       |       |       |       |       |       |       |   |      |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |
| 3.72                                                                                                                | 0.356                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 0.460                                                                                                               |                                                                                                                       |       |      |       |       |       |       |       |       |       |       |      |       |       |       |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |    |       |       |       |       |       |      |       |       |       |   |       |      |       |       |      |       |       |       |       |       |       |       |   |      |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |
| 4.89                                                                                                                | 0.389                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 0.455                                                                                                               |                                                                                                                       |       |      |       |       |       |       |       |       |       |       |      |       |       |       |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |    |       |       |       |       |       |      |       |       |       |   |       |      |       |       |      |       |       |       |       |       |       |       |   |      |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |
| 5.59                                                                                                                | 0.392                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 0.444                                                                                                               |                                                                                                                       |       |      |       |       |       |       |       |       |       |       |      |       |       |       |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |    |       |       |       |       |       |      |       |       |       |   |       |      |       |       |      |       |       |       |       |       |       |       |   |      |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |
| 6.28                                                                                                                | 0.399                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 0.444                                                                                                               |                                                                                                                       |       |      |       |       |       |       |       |       |       |       |      |       |       |       |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |    |       |       |       |       |       |      |       |       |       |   |       |      |       |       |      |       |       |       |       |       |       |       |   |      |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |
| %D                                                                                                                  | $K_s$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | $K_r$                                                                                                               |                                                                                                                       |       |      |       |       |       |       |       |       |       |       |      |       |       |       |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |    |       |       |       |       |       |      |       |       |       |   |       |      |       |       |      |       |       |       |       |       |       |       |   |      |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |
| 1.186                                                                                                               | 0.120                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 0.294                                                                                                               |                                                                                                                       |       |      |       |       |       |       |       |       |       |       |      |       |       |       |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |    |       |       |       |       |       |      |       |       |       |   |       |      |       |       |      |       |       |       |       |       |       |       |   |      |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |
| 1.40                                                                                                                | 0.125                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 0.252                                                                                                               |                                                                                                                       |       |      |       |       |       |       |       |       |       |       |      |       |       |       |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |    |       |       |       |       |       |      |       |       |       |   |       |      |       |       |      |       |       |       |       |       |       |       |   |      |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |
| 1.50*                                                                                                               | —                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 0.260                                                                                                               |                                                                                                                       |       |      |       |       |       |       |       |       |       |       |      |       |       |       |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |    |       |       |       |       |       |      |       |       |       |   |       |      |       |       |      |       |       |       |       |       |       |       |   |      |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |
| 1.63                                                                                                                | 0.124                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 0.266                                                                                                               |                                                                                                                       |       |      |       |       |       |       |       |       |       |       |      |       |       |       |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |    |       |       |       |       |       |      |       |       |       |   |       |      |       |       |      |       |       |       |       |       |       |       |   |      |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |
| 1.86                                                                                                                | 0.117                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 0.272                                                                                                               |                                                                                                                       |       |      |       |       |       |       |       |       |       |       |      |       |       |       |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |    |       |       |       |       |       |      |       |       |       |   |       |      |       |       |      |       |       |       |       |       |       |       |   |      |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |
| 2.325                                                                                                               | 0.096                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 0.317                                                                                                               |                                                                                                                       |       |      |       |       |       |       |       |       |       |       |      |       |       |       |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |    |       |       |       |       |       |      |       |       |       |   |       |      |       |       |      |       |       |       |       |       |       |       |   |      |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |
| 2.40*                                                                                                               | 0.095                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | —                                                                                                                   |                                                                                                                       |       |      |       |       |       |       |       |       |       |       |      |       |       |       |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |    |       |       |       |       |       |      |       |       |       |   |       |      |       |       |      |       |       |       |       |       |       |       |   |      |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |
| 2.91                                                                                                                | 0.108                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 0.317                                                                                                               |                                                                                                                       |       |      |       |       |       |       |       |       |       |       |      |       |       |       |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |    |       |       |       |       |       |      |       |       |       |   |       |      |       |       |      |       |       |       |       |       |       |       |   |      |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |
| 3.49                                                                                                                | 0.130                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 0.318                                                                                                               |                                                                                                                       |       |      |       |       |       |       |       |       |       |       |      |       |       |       |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |    |       |       |       |       |       |      |       |       |       |   |       |      |       |       |      |       |       |       |       |       |       |       |   |      |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |
| 4.65                                                                                                                | 0.148                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 0.310                                                                                                               |                                                                                                                       |       |      |       |       |       |       |       |       |       |       |      |       |       |       |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |    |       |       |       |       |       |      |       |       |       |   |       |      |       |       |      |       |       |       |       |       |       |       |   |      |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |
| 6.05                                                                                                                | 0.142                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 0.313                                                                                                               |                                                                                                                       |       |      |       |       |       |       |       |       |       |       |      |       |       |       |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |    |       |       |       |       |       |      |       |       |       |   |       |      |       |       |      |       |       |       |       |       |       |       |   |      |       |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |

Figura 5.8 Coeficientes de pérdida local por cambios de dirección

Para cada tipo de crucero se asignó el valor del coeficiente  $k$  correspondiente según las piezas especiales de cada crucero. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 5.23

Tabla 5.23 Coeficientes de pérdidas locales en Línea de Impulsión y de Gravedad

| Piezas especiales     | $K_s$ (Sotelo) | $V$ (m/s) | $h_L$ (m)<br>(SOTELO) |
|-----------------------|----------------|-----------|-----------------------|
| VAEA                  | 0.028          | 1.767     | 0.004                 |
| DESFOGUE              | 0.028          | 1.767     | 0.004                 |
| VAEA + SECCIONAMIENTO | 0.228          | 1.767     | 0.036                 |

De igual manera se calcularon los valores para cada una de las deflexiones horizontales de los trazos del acueducto. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 5.24 para el tramo de conducción por bombeo y en la Tabla 5.25 para el tramo de conducción por gravedad.



Tabla 5.24 Coeficientes de pérdidas locales en deflexiones Línea de Impulsión

| Cadenamiento | Deflexión | Ks<br>(Sotelo) | V (m/s) | hL (m)<br>(SOTELO) |
|--------------|-----------|----------------|---------|--------------------|
| 0+747.31     | 14°       | 0.0404         | 1.767   | 0.006              |
| 2+877.02     | 26°       | 0.0959         | 1.767   | 0.015              |
| 2+978.71     | 31°       | 0.1370         | 1.767   | 0.022              |
| 3+355.43     | 14°       | 0.0404         | 1.767   | 0.006              |
| 3+495.07     | 13°       | 0.0388         | 1.767   | 0.006              |
| 3+629.44     | 17°       | 0.0484         | 1.767   | 0.008              |
| 4+173.63     | 6°        | 0.0196         | 1.767   | 0.003              |
| 4+281.66     | 18°       | 0.0516         | 1.767   | 0.008              |
| 5+318.14     | 4°        | 0.0124         | 1.767   | 0.002              |
| 5+460.76     | 17°       | 0.0484         | 1.767   | 0.008              |
| 5+867.89     | 17°       | 0.0484         | 1.767   | 0.008              |
| 5+938.66     | 13°       | 0.0388         | 1.767   | 0.006              |
| 6+580.90     | 7°        | 0.0232         | 1.767   | 0.004              |
| 6+693.11     | 9°        | 0.0304         | 1.767   | 0.005              |
| 7+393.97     | 10°       | 0.0340         | 1.767   | 0.005              |
| 8+613.59     | 10°       | 0.0340         | 1.767   | 0.005              |
| 8+717.56     | 30°       | 0.1300         | 1.767   | 0.021              |
| 8+796.56     | 13°       | 0.0388         | 1.767   | 0.006              |
| 10+048.02    | 6°        | 0.0196         | 1.767   | 0.003              |
| 10+127.40    | 8°        | 0.0268         | 1.767   | 0.004              |
| 12+123.19    | 16°       | 0.0452         | 1.767   | 0.007              |
| 12+234.37    | 21°       | 0.0612         | 1.767   | 0.010              |
| 12+301.54    | 11°       | 0.0356         | 1.767   | 0.006              |
| 14+707.32    | 4°        | 0.0124         | 1.767   | 0.002              |
| 20+195.95    | 7°        | 0.0232         | 1.767   | 0.004              |
| 20+293.97    | 24°       | 0.0788         | 1.767   | 0.013              |
| 21+339.38    | 21°       | 0.0612         | 1.767   | 0.010              |
| 21+433.88    | 18°       | 0.0516         | 1.767   | 0.008              |
| 21+779.98    | 23°       | 0.0702         | 1.767   | 0.011              |
| 21+852.97    | 26°       | 0.0958         | 1.767   | 0.015              |
| 21+935.04    | 23°       | 0.0702         | 1.767   | 0.011              |
| 21+997.93    | 25°       | 0.0873         | 1.767   | 0.014              |
| 22+509.77    | 23°       | 0.0702         | 1.767   | 0.011              |
|              |           |                | Σ =     | 0.274              |



Tabla 5.25 Coeficientes de pérdidas locales en deflexiones Línea de Gravedad

| Cadenamiento | Deflexion | Ks     | V (m/s) | hL (m)<br>(SOTELO) |
|--------------|-----------|--------|---------|--------------------|
| 25+981.36    | 37°51'19" | 0.1855 | 1.799   | 0.031              |
| 26+809.84    | 11°22'46" | 0.0362 | 1.799   | 0.006              |
| 26+853.72    | 13°50'14" | 0.0401 | 1.799   | 0.007              |
| 27+863.82    | 22°58'04" | 0.0700 | 1.799   | 0.012              |
| 28+681.24    | 19°47'45" | 0.0580 | 1.799   | 0.010              |
| 29+824.27    | 11°24'29" | 0.0340 | 1.799   | 0.006              |
| 29+884.72    | 13°50'34" | 0.0400 | 1.799   | 0.007              |
| 30+580.00    | 4°40'26"  | 0.0160 | 1.799   | 0.003              |
| 31+967.10    | 21°11'27" | 0.0677 | 1.799   | 0.011              |
| 33+359.59    | 1°52'35"  | 0.0060 | 1.799   | 0.001              |
| 33+389.24    | 2°59'14"  | 0.0096 | 1.799   | 0.002              |
| 33+425.74    | 1°36'51"  | 0.0051 | 1.799   | 0.001              |
| 33+461.28    | 3°59'42"  | 0.0128 | 1.799   | 0.002              |
| 33+571.38    | 1°06'35"  | 0.0035 | 1.799   | 0.001              |
| 34+807.37    | 0°17'14"  | 0.0009 | 1.799   | 0.000              |
| 35+136.25    | 0°14'44"  | 0.0008 | 1.799   | 0.000              |
| 35+580.10    | 0°1'53"   | 0.0001 | 1.799   | 0.000              |
| 37+346.81    | 0°45'27"  | 0.0024 | 1.799   | 0.000              |
| 37+436.45    | 1°25'38"  | 0.0054 | 1.799   | 0.001              |
| 37+553.12    | 1°41'43"  | 0.0420 | 1.799   | 0.007              |
| 37+701.67    | 7°44'56"  | 0.0259 | 1.799   | 0.004              |
| 37+731.37    | 9°41'32"  | 0.0329 | 1.799   | 0.005              |
| 37+781.48    | 12°34'42" | 0.0381 | 1.799   | 0.006              |
| 38+264.87    | 08°50'08" | 0.0298 | 1.799   | 0.005              |
| 38+427.44    | 0°45'50"  | 0.0024 | 1.799   | 0.000              |
| 38+585.76    | 0°46'58"  | 0.0025 | 1.799   | 0.000              |
| 38+762.74    | 0°51'5"   | 0.0027 | 1.799   | 0.000              |
| 39+115.84    | 1°55'33"  | 0.0061 | 1.799   | 0.001              |
| 39+139.42    | 6°17'28"  | 0.0206 | 1.799   | 0.003              |
| 39+195.25    | 7°37'38"  | 0.0254 | 1.799   | 0.004              |
| 39+245.99    | 5°12'31"  | 0.0167 | 1.799   | 0.003              |
| 39+285.61    | 9°36'36"  | 0.0326 | 1.799   | 0.005              |
| 39+436.18    | 2°57'16"  | 0.0094 | 1.799   | 0.002              |
| 39+475.46    | 3°42'10"  | 0.0118 | 1.799   | 0.002              |
| 39+603.20    | 9°37'33"  | 0.0326 | 1.799   | 0.005              |
| 39+634.60    | 8°14'12"  | 0.0276 | 1.799   | 0.005              |
| 39+674.26    | 11°30'00" | 0.0364 | 1.799   | 0.006              |
| 39+711.89    | 8°51'32"  | 0.0299 | 1.799   | 0.005              |
| 39+750.26    | 9°50'32"  | 0.0334 | 1.799   | 0.006              |
| 40+791.31    | 3°53'42"  | 0.0124 | 1.799   | 0.002              |
| 39+866.36    | 3°38'57"  | 0.0117 | 1.799   | 0.002              |
| 40+317.20    | 0°34'56"  | 0.0007 | 1.799   | 0.000              |
| 40+695.43    | 7°12'40"  | 0.0239 | 1.799   | 0.004              |
| 40+770.99    | 5°43'26"  | 0.0186 | 1.799   | 0.003              |
| 40+993.17    | 1°40'29"  | 0.0053 | 1.799   | 0.001              |
| 41+112.37    | 1°1'58"   | 0.0033 | 1.799   | 0.001              |
| 41+143.58    | 5°37'13"  | 0.0182 | 1.799   | 0.003              |
| 41+280.46    | 0°55'16"  | 0.0029 | 1.799   | 0.000              |
| 41+438.84    | 7°1'17"   | 0.0233 | 1.799   | 0.004              |
| 41+502.92    | 6°18'29"  | 0.0207 | 1.799   | 0.003              |
| 41+673.57    | 6°18'14"  | 0.0207 | 1.799   | 0.003              |
| 41+775.06    | 8°02'51"  | 0.0270 | 1.799   | 0.004              |
| 41+994.12    | 8°38'3"   | 0.0291 | 1.799   | 0.005              |
| 42+154.58    | 7°12'55"  | 0.0240 | 1.799   | 0.004              |
| 42+178.94    | 5°29'18"  | 0.0178 | 1.799   | 0.003              |
| 42+273.90    | 4°28'43"  | 0.0143 | 1.799   | 0.002              |
|              |           |        | Σ =     | 0.22               |



## Software utilizado

Para efectuar la modelación de la línea de impulsión del acueducto en flujo permanente se utilizó el software WaterCad V8i de la empresa Bentley. WaterCad es un software comercial de análisis, modelación y gestión de redes y líneas a presión, propiedad de la Empresa de Software Bentley Systems, Incorporated.

WaterCAD permite la simulación hidráulica de un modelo computacional representado en este caso por elementos tipo: Línea (tramos de tuberías), Punto (Nodos de Consumo, Tanques, Reservorios, Hidrantes) e Híbridos (Bombas, Válvulas de Control, Regulación, etc.)

WaterCAD fue originalmente desarrollado por la Empresa Haestad Methods, Inc. con base en Watertown, CT (USA). Esta empresa fue adquirida por Bentley Systems a mediados del año 2004, adquisición a partir de la cual el producto comenzó a denominarse comercialmente como Bentley WaterCAD

El programa cuenta no solo con una solución robusta para la modelación hidráulica, sino también con herramientas avanzadas y módulos de calibración hidráulica, optimización de bombeos y diseño optimizado usando algoritmos genéticos. Entre las características más importantes del software se encuentran:

- Cuenta con las herramientas del administrador de escenarios, las cuales brindan gran flexibilidad mediante el uso de diferentes combinaciones de alternativas. Tanto los grupos de alternativas como de escenarios pueden ser administrados de manera jerárquica bajo una estructura parental (padre e hijo).
- Presenta herramientas de análisis extendido como: análisis de segmentación y estado crítico, análisis de incendio, análisis de vaciado unidireccional, análisis de costos de energía e integración a Bentley HAMMER para el análisis de transitorios hidráulicos.

Adicionalmente al uso de Watercad se utilizó el software Trans del Instituto de Ingeniería. Los resultados de ambos modelos fueron coincidentes.

## Proceso de modelación

La primera parte del proceso de modelación corresponde a la importación de la geometría del trazo, para efectuar este proceso se importaron las coordenadas geométricas del trazo propuesto tanto para el tramo de impulsión como para el de gravedad. Esto con el fin de modelar ambas líneas y revisar el comportamiento hidráulico simultáneamente.

Una vez cargada la geometría de la línea de conducción se colocan las características de las tuberías y los coeficientes de pérdida local. Finalmente, con los datos cargados, se efectúa la corrida del modelo verificando que los resultados cumplan con los parámetros de diseño indicados; de no cumplirse, se modifica el diseño.

Los valores correspondientes a las coordenadas del eje de trazo del Acueducto se pueden visualizar en las Tablas 5.26 y 5.27 correspondientes al tramo de conducción por bombeo y conducción por gravedad respectivamente.

*Tabla 5.26 Coordenadas del trazo de la línea de conducción Tramo Impulsión*

| PVI  | CAD.     | X            | Y              | Z        |
|------|----------|--------------|----------------|----------|
| 0    | 0        | 693,580.3942 | 2,247,566.2113 | 1,525.73 |
| 41   | 747.31   | 693,205.7478 | 2,248,207.0403 | 1,535.89 |
| 149  | 2877.02  | 692,568.8867 | 2,250,239.2947 | 1,547.51 |
| 155  | 2978.71  | 692,499.3278 | 2,250,313.4688 | 1,549.26 |
| 175  | 3355.43  | 692,137.2482 | 2,250,417.4685 | 1,576.31 |
| 183  | 3495.07  | 692,016.5168 | 2,250,487.6448 | 1,589.75 |
| 191  | 3629.44  | 691,918.5216 | 2,250,579.5820 | 1,582.08 |
| 220  | 4173.63  | 691,644.4917 | 2,251,049.7335 | 1,603.97 |
| 228  | 4281.66  | 691,580.4731 | 2,251,136.7540 | 1,600.67 |
| 280  | 5318.14  | 690,734.5408 | 2,251,735.6735 | 1,585.20 |
| 289  | 5460.76  | 690,612.5411 | 2,251,809.5425 | 1,584.77 |
| 312  | 5867.89  | 690,217.0798 | 2,251,906.3117 | 1,582.04 |
| 316  | 5938.66  | 690,146.4397 | 2,251,902.0359 | 1,583.33 |
| 350  | 6580.9   | 689,530.6208 | 2,251,719.7223 | 1,586.49 |
| 356  | 6693.11  | 689,419.8423 | 2,251,701.8437 | 1,586.67 |
| 392  | 7393.97  | 688,718.9942 | 2,251,705.5679 | 1,591.87 |
| 455  | 8613.59  | 687,516.0589 | 2,251,504.5427 | 1,609.29 |
| 461  | 8717.56  | 687,412.0914 | 2,251,505.6897 | 1,609.76 |
| 466  | 8796.56  | 687,344.1337 | 2,251,545.9757 | 1,610.48 |
| 530  | 10048.02 | 686,438.4094 | 2,252,409.5747 | 1,607.32 |
| 535  | 10127.4  | 686,375.6748 | 2,252,458.2092 | 1,607.72 |
| 638  | 12123.19 | 684,642.9260 | 2,253,448.5556 | 1,596.32 |
| 644  | 12234.37 | 684,564.7304 | 2,253,527.5892 | 1,593.80 |
| 649  | 12301.54 | 684,537.3299 | 2,253,588.9142 | 1,591.71 |
| 771  | 14707.32 | 683,998.4760 | 2,255,933.5692 | 1,600.87 |
| 1050 | 20195.95 | 682,365.4563 | 2,261,173.6316 | 1,584.08 |
| 1056 | 20293.97 | 682,325.1825 | 2,261,263.0006 | 1,581.70 |
| 1109 | 21339.38 | 681,539.2163 | 2,261,952.3000 | 1,544.90 |
| 1115 | 21433.88 | 681,450.7572 | 2,261,985.5460 | 1,546.96 |
| 1134 | 21779.98 | 681,105.0031 | 2,262,001.0047 | 1,549.14 |
| 1139 | 21852.97 | 681,039.1341 | 2,262,032.4636 | 1,548.72 |
| 1144 | 21935.04 | 680,957.0733 | 2,262,031.5954 | 1,547.81 |
| 1148 | 21997.93 | 680,899.3246 | 2,262,006.6950 | 1,546.88 |
| 1175 | 22509.77 | 680,387.6748 | 2,262,020.8505 | 1,544.83 |
| 1349 | 25920    | 677,286.7687 | 2,263,440.0175 | 1,609.38 |

*Tabla 5.27 Coordenadas del trazo de la línea de conducción Tramo Gravedad*

| PVI | CAD       | X           | Y            | Z        |
|-----|-----------|-------------|--------------|----------|
| 0   | 25+920.00 | 677286.7687 | 2263440.0175 | 1,609.38 |
| 4   | 25+981.36 | 677230.5537 | 2263464.6159 | 1,609.28 |
| 48  | 26+809.84 | 676829.8816 | 2264189.7302 | 1,602.06 |
| 51  | 26+853.72 | 676801.1384 | 2264222.8829 | 1,600.20 |
| 104 | 27+863.82 | 675976.1250 | 2264805.6750 | 1,601.43 |
| 147 | 28+681.24 | 675177.3778 | 2264979.3872 | 1,587.45 |
| 205 | 29+824.27 | 674209.8167 | 2265587.9393 | 1,582.25 |
| 209 | 29+884.72 | 674166.2511 | 2265629.8436 | 1,583.97 |
| 245 | 30+580.00 | 673795.0230 | 2266217.7301 | 1,573.07 |
| 318 | 31+967.10 | 673152.2518 | 2267446.9054 | 1,561.28 |
| 390 | 33+359.59 | 673002.2214 | 2268831.2842 | 1,551.69 |
| 393 | 33+389.58 | 672998.1173 | 2268860.9881 | 1,551.15 |
| 396 | 33+425.74 | 672991.3080 | 2268896.5031 | 1,550.76 |
| 399 | 33+461.28 | 672983.6349 | 2268931.2059 | 1,550.27 |
| 405 | 33+571.38 | 672952.4334 | 2269036.7919 | 1,548.72 |
| 468 | 34+807.37 | 672579.2693 | 2270215.1066 | 1,529.02 |
| 485 | 35+136.70 | 672478.2284 | 2270528.5484 | 1,527.06 |
| 509 | 35+580.10 | 672343.9956 | 2270951.1475 | 1,526.71 |
| 599 | 37+346.81 | 671807.1269 | 2272634.3008 | 1,528.41 |
| 604 | 37+436.45 | 671778.6935 | 2272719.3170 | 1,528.76 |
| 611 | 37+553.12 | 671738.9445 | 2272829.0058 | 1,529.22 |
| 620 | 37+701.67 | 671684.2255 | 2272967.1058 | 1,529.49 |
| 622 | 37+731.37 | 671669.6594 | 2272992.9949 | 1,529.68 |
| 626 | 37+781.48 | 671638.0879 | 2273031.9048 | 1,529.72 |
| 651 | 38+264.87 | 671258.9946 | 2273331.8244 | 1,530.64 |
| 660 | 38+427.44 | 671130.0386 | 2273430.8247 | 1,531.21 |
| 669 | 38+585.76 | 671005.7587 | 2273528.8960 | 1,531.77 |
| 679 | 38+762.74 | 670868.3357 | 2273640.4193 | 1,532.59 |
| 697 | 39+115.84 | 670590.8824 | 2273858.8257 | 1,533.77 |
| 700 | 39+139.42 | 670571.8786 | 2273872.7768 | 1,534.04 |
| 704 | 39+195.25 | 670523.5210 | 2273900.6873 | 1,534.24 |
| 708 | 39+245.99 | 670483.3309 | 2273931.6597 | 1,534.22 |
| 711 | 39+285.61 | 670454.2763 | 2273958.5913 | 1,534.48 |
| 719 | 39+436.18 | 670362.4885 | 2274077.9452 | 1,534.77 |
| 722 | 39+475.46 | 670340.1784 | 2274110.2768 | 1,535.09 |
| 738 | 39+711.89 | 670226.2113 | 2274312.3910 | 1,535.92 |
| 741 | 39+750.26 | 670226.1522 | 2274350.7646 | 1,536.00 |
| 744 | 39+791.31 | 670233.1056 | 2274391.2143 | 1,536.17 |
| 749 | 39+866.36 | 670250.8154 | 2274464.1467 | 1,536.34 |
| 772 | 40+317.20 | 670329.1004 | 2274908.1434 | 1,537.97 |
| 792 | 40+695.43 | 670398.5569 | 2275279.9362 | 1,539.87 |
| 797 | 40+770.99 | 670421.6467 | 2275351.8838 | 1,540.30 |
| 809 | 40+993.17 | 670468.1020 | 2275569.1531 | 1,540.93 |
| 816 | 41+112.37 | 670489.6078 | 2275686.3937 | 1,544.05 |
| 819 | 41+143.58 | 670495.7921 | 2275716.9895 | 1,544.58 |
| 827 | 41+280.46 | 670535.9197 | 2275847.8536 | 1,545.48 |
| 835 | 41+438.84 | 670579.9098 | 2276000.0000 | 1,549.06 |
| 840 | 41+502.92 | 670590.0501 | 2276063.2737 | 1,550.54 |
| 849 | 41+673.57 | 670635.4033 | 2276227.7845 | 1,554.64 |
| 855 | 41+775.06 | 670672.9578 | 2276322.0759 | 1,556.10 |
| 867 | 41+994.12 | 670724.7246 | 2276534.9341 | 1,562.88 |
| 876 | 42+154.58 | 670738.8065 | 2276694.7734 | 1,571.53 |
| 878 | 42+178.94 | 670743.9753 | 2276718.5795 | 1,573.02 |
| 884 | 42+273.90 | 670772.9067 | 2276809.0245 | 1,580.13 |
| 891 | 42+380.00 | 670801.6843 | 2276907.1881 | 1,586.87 |

El análisis de flujo permanente se realizó considerando tubería nueva y tubería usada, bajo la curva de operación del equipo de bombeo seleccionado y se demuestra que, para todas las condiciones, las bombas operan dentro la curva carga-gasto proporcionada por el fabricante. Esto evita la necesidad de colocar una válvula de control de gasto y presión en la descarga de la planta de bombeo. En la Figura 5.9 y la Tabla 5.28 se muestran los puntos de operación carga-gasto para condición de tubería nueva para los dos niveles de operación determinados por los niveles máximo ordinario y mínimo del Lago de Chapala.

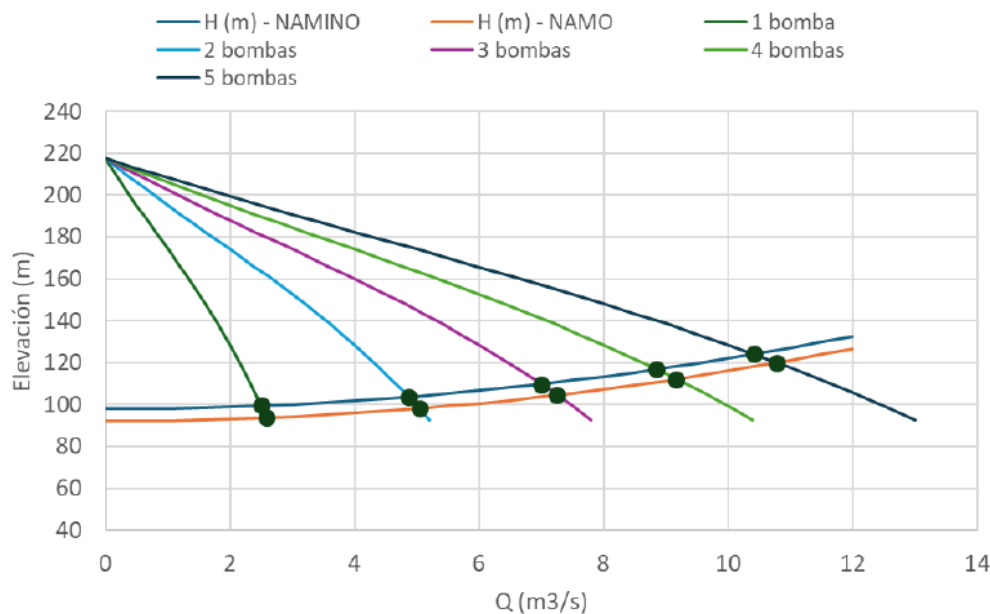


Figura 5.9 Puntos de operación carga-gasto para condición de tubería nueva

Tabla 5.28 Datos de Puntos de Operación con condición de Tubería Nueva

| Gasto por bomba                                 | Carga de bombeo | Eficiencia | Potencia por bomba | Bombas en operación | Gasto de operación | Consumo por m3 |
|-------------------------------------------------|-----------------|------------|--------------------|---------------------|--------------------|----------------|
| (m³/s)                                          | (m)             |            | (kW)               |                     | (m³/s)             | (kW-hr/m³)     |
| <b>NAMINO = 1516 m; Tubería nueva f = 0.015</b> |                 |            |                    |                     |                    |                |
| 2.498                                           | 99.50           | 0.806      | 3,025.9            | 1                   | 2.498              | 0.336          |
| 2.433                                           | 103.70          | 0.820      | 3,016.2            | 2                   | 4.865              | 0.344          |
| 2.333                                           | 109.80          | 0.839      | 2,997.0            | 3                   | 7.000              | 0.357          |
| 2.213                                           | 116.86          | 0.855      | 2,968.0            | 4                   | 8.851              | 0.373          |
| 2.083                                           | 124.11          | 0.865      | 2,931.8            | 5                   | 10.413             | 0.391          |
| <b>NAMO = 1522 m; Tubería nueva f = 0.015</b>   |                 |            |                    |                     |                    |                |
| 2.588                                           | 93.61           | 0.783      | 3,034.0            | 1                   | 2.588              | 0.326          |
| 2.520                                           | 98.12           | 0.801      | 3,028.4            | 2                   | 5.040              | 0.334          |
| 2.417                                           | 104.66          | 0.824      | 3,013.5            | 3                   | 7.251              | 0.346          |
| 2.292                                           | 112.24          | 0.845      | 2,987.7            | 4                   | 9.169              | 0.362          |
| 2.157                                           | 120.01          | 0.860      | 2,953.0            | 5                   | 10.785             | 0.380          |



Para el caso de la condición de tubería usada la Figura 5.10 muestra el comportamiento gráficamente y en la Tabla 5.29 se muestran los valores

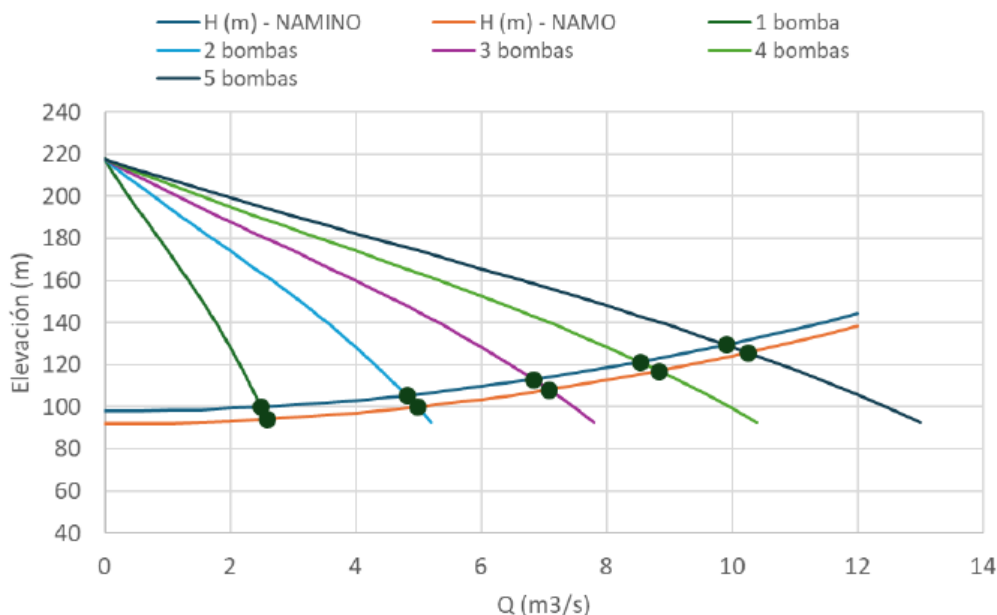


Figura 5.10 Puntos de operación carga-gasto para condición de tubería usada

Tabla 5.29 Datos de Puntos de Operación con condición de Tubería Usada

| Gasto por bomba                                 | Carga de bombeo | Eficiencia | Potencia por bomba | Bombas en operación | Gasto de operación | Consumo por m3 |
|-------------------------------------------------|-----------------|------------|--------------------|---------------------|--------------------|----------------|
| (m³/s)                                          | (m)             |            | (kW)               |                     | (m³/s)             | (kW-hr/m³)     |
| <b>NAMINO = 1516 m; Tubería usada f = 0.020</b> |                 |            |                    |                     |                    |                |
| 2.491                                           | 100.00          | 0.808      | 3,024.9            | 1                   | 2.491              | 0.337          |
| 2.405                                           | 105.44          | 0.826      | 3,011.3            | 2                   | 4.809              | 0.348          |
| 2.279                                           | 113.04          | 0.847      | 2,984.6            | 3                   | 6.836              | 0.364          |
| 2.132                                           | 121.40          | 0.862      | 2,946.1            | 4                   | 8.528              | 0.384          |
| 1.980                                           | 129.54          | 0.867      | 2,901.1            | 5                   | 9.902              | 0.407          |
| <b>NAMO = 1522 m; Tubería usada f = 0.020</b>   |                 |            |                    |                     |                    |                |
| 2.580                                           | 94.14           | 0.785      | 3,033.5            | 1                   | 2.580              | 0.327          |
| 2.491                                           | 99.98           | 0.808      | 3,024.9            | 2                   | 4.982              | 0.337          |
| 2.361                                           | 108.14          | 0.834      | 3,002.8            | 3                   | 7.082              | 0.353          |
| 2.208                                           | 117.11          | 0.855      | 2,966.9            | 4                   | 8.834              | 0.373          |
| 2.051                                           | 125.82          | 0.866      | 2,922.4            | 5                   | 10.254             | 0.396          |

Una vez efectuado el cálculo en régimen permanente utilizando el programa WaterCad, se exportó la configuración geométrica al software Hammer V8i, donde se completaron los datos de celeridad de onda.

Los cálculos que se realizaron consideraron lo establecido en los lineamientos técnicos de la Comisión Nacional del Agua, en su libro Conducciones, del Manual de Diseño de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. En general, en lo que se refiere a la sobrepresión, los cálculos están basados en la teoría de la celeridad, que consiste en la velocidad de propagación de la onda de presión a través del agua, la cual depende entre otras cosas de la elasticidad del material de fabricación de las paredes de la tubería; para determinar el valor del incremento de la presión se usa la fórmula conocida como de Joukowski, donde además de la celeridad se usan el valor del diferencial de velocidad y la aceleración de la gravedad como valor constante.

La ecuación de la celeridad es:

$$a = \frac{a_0}{\sqrt{1 + \frac{E_a D}{E_m e}}} \dots (1)$$

donde:

$a$  = Celeridad de la onda de presiones;

$a_0$  = velocidad del sonido en el agua, 1,440 m/s

$E_a$  = Módulo de elasticidad del agua; 22,313 kg/cm<sup>2</sup>

$E_m$  = Módulo de elasticidad del material del tubo; 2,110,812 Kg/cm<sup>2</sup>

$D$  = Diámetro interior del tubo; 2.654 m

$e$  = Espesor de las paredes del tubo. 0.01905 m

Sustituyendo los valores en la fórmula anterior, se obtiene la celeridad  $a$  en m/s

$$a = \frac{1,440}{\sqrt{1 + \frac{22,313 \cdot 2.654}{2,110,812 \cdot 0.01905}}} = 915.72$$

El software HAMMER tiene un factor de corrección que depende de las características del soporte de la tubería y del coeficiente de Poisson. Por lo que dentro del software el valor de celeridad para la conducción es de 967.91 m/s

A través de su base de datos y de sus herramientas de manejo de escenarios, el HAMMER es capaz de evaluar la infraestructura del sistema de conducción resolviendo ecuaciones hidráulicas como la de Hazen-Williams y/o Darcy-Weisbach, entre otras. El HAMMER también puede simular las conducciones bajo condiciones estables de flujo permanente o de operación normal.

El proyecto es la base de trabajo dentro del HAMMER. Un proyecto contiene todos los datos para un modelo de sistema de conducción, lo cual incluye escenarios de operación, mapa de tuberías, atributos de los componentes de la red, parámetros de modelaje, soluciones y resultados del modelo; y elementos adicionales como gráficas, curvas de nivel, reportes y archivos de entrada/salida. Para la modelación de esta conducción, se incluyó en la revisión esencialmente la información obtenida con anterioridad como parte del diseño de la línea de conducción.

Los siguientes tipos de componentes principales se integran, como revisión hidráulica, al modelo en el Hammer:

- Tubería: Representan las conexiones entre los elementos del modelo. En estos componentes se puede rastrear el flujo que transita.
- Nodos: Representan puntos donde se interceptan las conexiones (tuberías) y donde se evalúan las presiones de la línea de conducción en este caso de impulsión.
- Tanques: Representan la ubicación de las estructuras de almacenamiento de agua.

- **Válvulas:** Representan las conexiones unidireccionales que controlan el flujo o presión en los elementos de conducción; dicho parámetro es definido por el usuario. En la Tabla 5.30 se muestra un ejemplo de algunos elementos integrados en el modelo.

*Tabla 5.30 Valores Iniciales para Modelo Hidráulico*

| <b>Etiqueta</b> | <b>Nodo Inicial</b> | <b>Carga (Inicial en<br/>Nodo Inicial,</b> | <b>Nodo Final</b> | <b>Carga (Inicial<br/>en Nodo Final,</b> |
|-----------------|---------------------|--------------------------------------------|-------------------|------------------------------------------|
| P-9             | PMP-3               | 1,648.50                                   | J-5               | 1,645.40                                 |
| P-12            | PMP-4               | 1,648.50                                   | J-7               | 1,645.40                                 |
| P-15            | PMP-5               | 1,648.50                                   | J-9               | 1,645.40                                 |
| P-2             | PMP-1               | 1,648.40                                   | J-1               | 1,645.30                                 |
| P-6             | PMP-2               | 1,648.40                                   | J-3               | 1,645.40                                 |
| P-7             | J-3                 | 1,645.40                                   | J-4               | 1,645.00                                 |
| P-10            | J-5                 | 1,645.40                                   | J-6               | 1,645.00                                 |
| P-13            | J-7                 | 1,645.40                                   | J-8               | 1,645.00                                 |
| P-16            | J-9                 | 1,645.40                                   | J-10              | 1,645.00                                 |

El HAMMER basa su modelación en la teoría elástica, aplicando el llamado método de caracteres que es el más ampliamente usado y probado para resolver ecuaciones diferenciales parciales transformándolas en dos pares de ecuaciones por medio de las cuales se determinan presiones y velocidades en cada nodo cargado a la simulación y en distintos momentos del tiempo de la corrida, para finalmente arrojar como resultado valores máximos y mínimos en tales nodos.

Otros datos que se requieren para la simulación del fenómeno transitorio en el programa de cómputo son referentes a las características de los equipos de bombeo, tales como su curva de operación (carga-caudal), su potencia y su momento de inercia. Estos datos generalmente se obtienen del propio fabricante del equipo de bombeo que se tenga seleccionado, aunque del que con mayor dificultad se dispone es el momento de inercia; sin embargo, es posible calcularlo mediante algunas ecuaciones con las que se cuenta, tales como la de Linton o la del Bureau of Reclamation, en las que interviene la potencia del equipo y su velocidad de rotación.

Para realizar la simulación del fenómeno transitorio con cualquier programa de cómputo, se deben integrar no sólo las características relacionadas con la línea de conducción por impulsión, sino también el sistema de bombeo del cual ésta arranca. Por tanto, en este caso se consideran los equipos de bombeo y su respectivo múltiple de descarga que se definen en el proyecto de la Planta de Bombeo.

## 5.2.8. Modelación del fenómeno transitorio

### Método de las características

El estudio de transitorios hidráulicos se considera generalmente haber comenzado con las obras de Joukowski (1898) y Allievi (1902). El desarrollo histórico de este tema hace que para una buena lectura (Wood F., 1970). Un número de pioneros hizo contribuciones innovadoras en el campo, incluyendo R. Angus y John Parmakian (1963), que popularizó y refinó el método de cálculo gráfico.

Benjamin Wylie y Victor Streeter (1993) combinan el método de características con el modelado por ordenador. El campo de los transitorios de fluido todavía está evolucionando rápidamente en todo el mundo (Brunone et al, 2000; Koelle y Luvizotto, 1996; Filion y Karney, 2002; Hamam y McCorquodale, 1982; Savic y Walters, 1995; Walski y laúdes, 1994; Wu y Simpson, 2000).

Varios métodos han sido desarrollados para resolver flujo transitorio en las tuberías. Estos van desde ecuaciones aproximadas a soluciones numéricas de las ecuaciones no lineales de Navier-Stokes.

Una vez establecido el diseño en flujo permanente se realizó la revisión del fenómeno transitorio, el cual será ocasionado por un paro súbito del equipo de bombeo.

Para efectuar este diseño se consideraron válvula con actuadores que permitirán efectuar un cierre lento del sistema, con un tiempo total de cierre de 600 segundos; siguiendo el patrón mostrado en la **Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

$$C^+ \begin{cases} \frac{g}{a} \frac{dH}{dt} + \frac{dV}{dt} + \frac{fV|V|}{2D} = 0 \\ \frac{dx}{dt} = +a \end{cases}$$

$$C^- \begin{cases} -\frac{g}{a} \frac{dH}{dt} + \frac{dV}{dt} + \frac{fV|V|}{2D} = 0 \\ \frac{dx}{dt} = -a \end{cases}$$

Donde:

$C^+$  Línea característica hacia la derecha

$C^-$  Línea característica hacia la izquierda

$g$  Gravedad terrestre

$dt$  Incremento de tiempo

$dV$  Incremento de velocidad

$dx$  Incremento de distancia

$dH$  Incremento de elevación

$V$  Velocidad del flujo

$D$  Diámetro

$a$  Celeridad de onda

Estas ecuaciones no se pueden resolver analíticamente, pero pueden ser expresados gráficamente en espacio-tiempo como líneas características (o curvas), llamadas características, que representan señales que se propagan hacia la derecha ( $C^+$ ) y a la izquierda ( $C^-$ ) simultáneamente y de cada ubicación en el sistema, como se muestra en la figura siguiente.

En cada punto de solución interior, las señales llegan de los dos puntos adyacentes de forma simultánea. Una combinación lineal de  $H$  y  $V$  es invariante a lo largo de cada característica si se descuidan las pérdidas por fricción; Por lo tanto,  $H$  y  $V$  se pueden obtener exactamente en los puntos de solución. Con pérdidas de carga concentrados en los puntos de la solución y la

CEA-PRO-EST-LP-016-25

PROYECTO EJECUTIVO PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LA INFRAESTRUCTURA  
DEL ACUEDUCTO SUSTITUTO CHAPALA-GUADALAJARA



suposición de que la fricción es pequeña, un procedimiento iterativo se utiliza en conjunción con MOC para avanzar en la solución en el tiempo.

Esencialmente consiste en resolver estas ecuaciones, para cada paso punto y tiempo de solución, para una amplia variedad de condiciones de contorno y topologías de sistema. Ver Figura 5.11

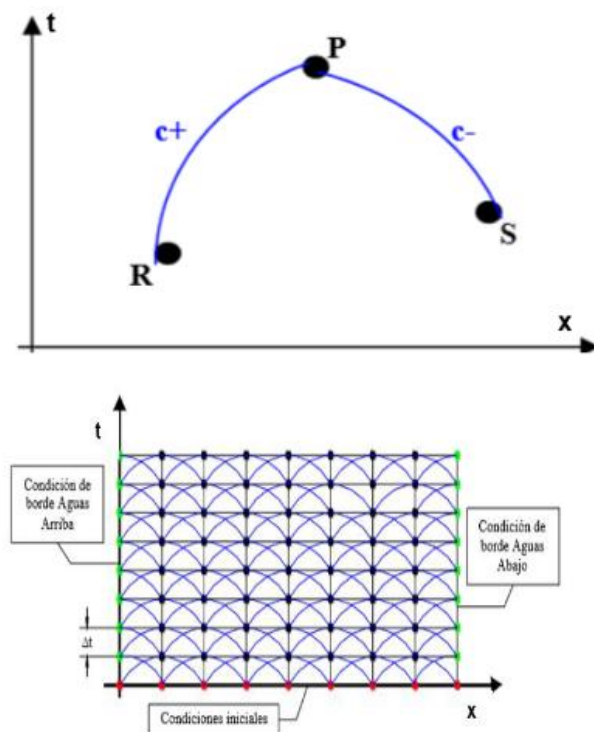


Figura 5.11 Diagrama espacio – tiempo para explicar curvas características (Pérez, 2005)

#### ■ Condiciones de borde o frontera

Son fundamentales para el desarrollo del método de las características.

Las condiciones de contorno también deben ser expresadas como ecuaciones algebraicas y/o diferenciales en función de sus propiedades físicas. Esto debe hacerse para cada elemento hidráulico en el modelo y resolverse junto con las ecuaciones características.

Existen condiciones de frontera de variada complejidad y también es necesario establecer sus ecuaciones características; a continuación, se enuncian las condiciones de frontera más usuales:

- Depósito ubicado en extremo aguas arriba o aguas abajo con nivel constante. Las curvas características de esta condición de borde dependen en gran proporción de su nivel de superficie libre, no obstante, cuando las pérdidas por ingreso o salida son importantes las ecuaciones características se ven afectadas por los coeficientes de pérdida singular.
- Válvula ubicada en extremo aguas abajo. La ecuación característica depende del coeficiente de descarga de la válvula, área de apertura y de la carga piezométrica.
- Orificio en extremo aguas abajo. La ecuación característica es similar a la de una válvula, sin embargo, el área transversal permanece constante.
- Variación de diámetros y propiedades elásticas de los conductos. Para definir las ecuaciones características se toma en consideración las pérdidas de carga locales en el cambio de diámetro y el cambio de geometría transversal.

- Bombas rotodinámica en extremo aguas arriba. La definición de las curvas características para las bombas depende de la curva caudal – carga piezométrica a una determinada velocidad de giro.

▪ Criterio de Courant

Los resultados que se obtienen con el método de las características son muy sensibles y variantes conforme a los diferenciales de tiempo ( $\Delta t$ ) y espacio ( $\Delta x$ ) que se utilicen; por tanto, se deben definir estos diferenciales de una manera tal que la resolución del sistema de ecuaciones sea estable y convergente.

Dada la naturaleza matemática de las ecuaciones diferenciales de flujo transitorio (no lineales), los métodos para determinar la convergencia y estabilidad son muy complejos; por tanto, se recurre a linealizar estas ecuaciones y en función del esquema de diferencias finitas en el campo ( $x - t$ ) se ha logrado definir que los modelos cumplen las condiciones de estabilidad y convergencia bajo la siguiente expresión:

$$\frac{\Delta_t}{\Delta_x} \leq \frac{1}{a}$$

Donde:

$\Delta_t$  Incremento de tiempo

$\Delta_x$  Incremento de longitud

$a$  Celeridad de la onda

Esta condición es el denominado *Criterio de Courant*.

La selección del diferencial o intervalo de tiempo se vuelve complejo cuando existen dos o más conductos con diferentes propiedades elásticas y/o geométricas. Si el intervalo de tiempo es tal que la longitud del tramo para cualquier conducto en el sistema no es igual al producto de la celeridad por  $\Delta t$ , entonces  $\Delta x$  debe ser mayor que  $a \cdot \Delta t$  para satisfacer los criterios de estabilidad.

De acuerdo al criterio de (CHAUDHRY, 1979), cuando el rango de variación de las longitudes de los conductos en análisis es pequeño, tan solo es necesario realizar un simple ajuste de velocidades de onda ( $a$ ) entre los conductos para alcanzar resultados suficientemente precisos; por lo que se debe satisfacer la siguiente ecuación:

$$\Delta_t = \frac{L_i}{a_i * n_i}$$

Donde:

$i$  Subíndice que identifica al número de conducto que conforma el sistema (1-N).

$L_i$  Longitud del conducto  $i$

$a_i$  Celeridad en el conducto  $i$

$n_i$  Número de tramos en que se divide el conducto  $i$

Este balanceo y ajuste de la celeridad de onda en los conductos es una técnica de gran aplicabilidad para tanteos sucesivos hasta alcanzar los valores adecuados de  $\Delta x$  y  $\Delta t$  que arrojen un menor error.

▪ Efecto de las ventosas

Para cualquier tipo nodal en comunicación con la atmósfera (por ejemplo, descarga a la atmósfera, la válvula de aire), el aire puede ser inyectado en la tubería cuando el (manométrica) presión local cae a cero o por debajo. En el caso específico de una válvula de aire, el aire inyectado es expulsado de la tubería bajo presión a través de un orificio restrictivo con el fin de amortiguar el impacto subsiguiente de las reincorporándose columnas de líquido adyacentes. Por lo tanto, en la siguiente discusión, aunque se hará referencia a una válvula de aire, se debe observar que el aire inyectado permanecerá a presión atmosférica para todos los otros tipos nodales capaces de permitir la entrada de aire. En consecuencia, en la versión actual de HAMMER,

la entrada de aire o escapar en una pequeña grieta o agujero en la tubería, la válvula y / o en las articulaciones sólo puede ser representado por una válvula de aire.

Hay dos modelos para las válvulas de aire: elástico (concentrado) y la columna rígida. El primero es un tratamiento más estándar en el que cada bolsa de aire se localiza en su punto de formación, mientras que el último es un innovador representación columna rígida de las ramas adyacentes con el seguimiento de la interfaz aire-líquido.

#### ▪ Coeficiente de fricción en el fenómeno transitorio

En comparación con un estado estacionario, la fricción de fluido aumenta durante eventos transitorios hidráulicos porque los cambios rápidos en la presión transitoria y a aumentar el flujo de cizallamiento turbulento. Bentley HAMMER V8i puede realizar un seguimiento de los efectos de las aceleraciones de fluidos para estimar la atenuación de energía transitoria más de cerca de lo que sería posible con casi estacionario o en estado estacionario fricción.

Se sabe que la velocidad de pasada y / o aceleración temporal juegan un papel significativo en la determinación de la fricción transitorio (Brunone et al, 1991; Bughazem y Anderson, 2000; Vardy y Hwang, 1991). Motivados por datos experimentales y publicados fórmulas en los últimos años para estimar el factor de fricción transitorio (Brunone et al, 2000; Vardy y Brown, 1995; Vitkovsky et al, 2000), se han propuesto un modelo de fricción inestable definido por una amplificación de el factor de fricción casi estacionario por el siguiente factor:

$$1 + \text{Min}(\alpha) \left| \frac{\partial V}{\partial t} \right| / g, \beta$$

donde V es la velocidad, t es tiempo, g es la aceleración gravitacional. La derivada parcial de la velocidad con respecto al tiempo es la aceleración temporal en cualquier punto y se evalúa en el paso de tiempo anterior en esta área. Un método alternativo de fricción transitoria también se ha proporcionado (Bergant, Simpson y Vitkovsky, 2001). La selección de "inestable - Vitkovsky" como método de fricción transitoria empleará la siguiente formulación:

$$f = f_q + \frac{kD}{V|V|} \left( \frac{\partial V}{\partial t} + \text{asign}(V) \left| \frac{\partial V}{\partial x} \right| \right)$$

Donde F es el factor de fricción de Darcy-Weisbach,  $f_q$  es el componente cuasi-estacionario del factor de fricción (basado en la actualización de número de Reynolds para cada nuevo cálculo), D es el diámetro del tubo, V es la velocidad del flujo, t es el tiempo, a es onda velocidad, señal (V) es igual a 1 cuando la velocidad es mayor que cero y -1 cuando la velocidad es inferior a cero, x es la distancia, y k es el coeficiente de fricción de Brunone.

#### ▪ Cavitación

Durante un análisis de transitorios, si la presión manométrica, P, de los descensos de fluido a su límite de presión de vapor,  $P_0$ , a continuación, vapor comenzará a formar y el volumen de vapor se expandirá en todos los puntos de cálculo mientras persiste  $P_0$ . De hecho, como la presión se aproxima a  $P_0$ , el aire será liberado de la solución y la velocidad de la onda disminuirá; este comportamiento puede ser simulado utilizando el factor de reducción de la velocidad de onda.

Para simplificar, vamos a centrarnos en un punto interior de un tubo. Con la inclusión de fricción, hay tres incógnitas en cada paso de tiempo para cada punto interior en el flujo de una sola fase: dos cabezas y una descarga. De hecho, con el fin de realizar el seguimiento del volumen (s) de vapor,  $X_i$ ,  $i = 1, 2$ , que puede formar, se requieren variables adicionales para registrar tales volúmenes. Existen dos hipótesis fundamentales invocados en el tratamiento de bolsas de vapor:

- Bolsas de vapor ocupan el área de sección transversal completa
- Bolsas de vapor se localizan en el punto de formación

Aunque estas hipótesis no son del todo válida - por razones físicas y lógicas - resulta que es difícil, si no imposible proceder sin ellos y que nos permite predecir el comportamiento del sistema notablemente bien (Provoost, 1976). En virtud de estos supuestos, no hay flujo a través de un bolsillo y la interfaz entre el vapor y restos líquidos fijos en el espacio.

## Software utilizado

Bentley HAMMER es un simulador numérico avanzado de fenómenos transitorios hidráulicos (golpes de ariete) en los sistemas de agua, aguas residuales, industriales y de minería.

El motor de cálculo de Bentley HAMMER para el análisis dinámico de transitorios hidráulicos está basado en el Método de las Características (MOC). Los principales investigadores del fenómeno del transitorio están de acuerdo en que el Método de las Características, es el más adecuado para resolver rigurosamente las ecuaciones de continuidad y momentum del fenómeno tanto en sistemas simples como complejos.

Este software permite simular el impacto de una amplia variedad de equipos destinados a proteger el sistema frente a los efectos del Golpe de Ariete. El usuario puede seleccionar más de 20 dispositivos y ejecutar un número ilimitado de escenarios de operación, para desarrollar y definir la estrategia más adecuada encaminada a la mitigación de la sobrepresión.

Por otra parte, presenta herramientas de análisis y visualización de datos que permiten capturar el rápido movimiento del fenómeno del transitorio, determinar su impacto en el sistema, y seleccionar el equipo más adecuado para la protección del mismo.

El motor de cálculo de Bentley HAMMER V8i se basa en la tecnología creada originalmente por Hidráulica Ambiental Grupo (GENIVAR), dirigido por el Dr. Alan Fok, P. Eng., Un especialista en hidráulica designada, y asistido por el Dr. Sheldon Zemell. Bentley Systems y GENIVAR han forjado una colaboración a largo plazo para apoyar y mejorar Bentley HAMMER V8i. El software está diseñado para representar la última tecnología en el análisis y diseño de los golpes de ariete. Algunos de los textos de esta sección es una adaptación del capítulo 13 de Modelado Haestad Pulse avanzada Agua Distribución y Gestión (AWDM), escrito por el Dr. Edmundo Koelle, el Dr. Thomas Walski, PE, y el personal Haestad, o se extrae a partir de Alan Fok publicaciones anteriores técnicas y tesis doctorales.

Adicionalmente se realizó otro modelo en el software TRANSDOCENCIA desarrollado por el Instituto de Ingeniería de la UNAM y disponible en el portal del mismo Instituto. La información relativa a este modelo se presenta en un Anexo.

## Proceso de modelación

### Criterios de Modelación de la Línea Mediante el Software Hammer

Antes de ingresar los datos necesarios para las corridas del análisis hidráulico a flujo transitorio se realizó el análisis a flujo establecido para determinar el caudal que se estaría conduciendo con los datos de las bombas, longitudes y diámetros de la línea.

Al efectuar las corridas del programa de cómputo de análisis transitorio, se consideró en todos los casos un paro repentino del equipo de bombeo donde existe una válvula de no retorno.

El procedimiento de diseño es el siguiente:

1. Paro accidental del equipo de bombeo sin dispositivo de alivio, considerando el bombeo total.
2. Si en el paso número 1 se presentan presiones inadecuadas, se buscará el dispositivo de alivio más adecuado para resolver el problema, proponiendo diferentes dimensiones de dispositivos y corriendo el programa cada vez para simular el transitorio originado por un paro accidental del equipo de bombeo.
3. Revisión del sistema de conducción a flujo transitorio contemplando el dispositivo de alivio encontrado en el paso 2 para otros escenarios posibles de operación.



Los datos considerados para desarrollar el análisis se presentan en la siguiente tabla. 5.31

*Tabla 5.31 Datos de entrada para el Análisis de Transitorio en Línea de Agua Potable (Hammer)*

| No. | DESCRIPCIÓN                      | VALOR            | UNIDAD             | COMENTARIOS                                                        |
|-----|----------------------------------|------------------|--------------------|--------------------------------------------------------------------|
| 1   | Material y norma de tubería      | Acero            | No aplica          | ASTM A-53 Grado B                                                  |
| 2   | Presión nominal de tubería       | 17.57            | Kg/cm <sup>2</sup> |                                                                    |
| 3   | Diámetro de tubería              | 2692.4           | mm                 | Diámetro exterior                                                  |
| 4   | Espesor medio de tubería         | 19.05            | mm                 |                                                                    |
| 5   | Longitud de conducción           | 25,920<br>16,460 | m                  | Línea Impulsión<br>Línea Gravedad                                  |
| 6   | Desnivel estático de Bombeo      | 98.00            | m                  | Desde nivel menor de operación en EB<br>hasta el de entrega en TCR |
| 7   | Altura de columna de bombeo      | 26.00            | m                  |                                                                    |
| 8   | Carga normal de operación        | 138.00           | m.c.a.             |                                                                    |
| 9   | Carga máxima en el sistema       | 212.98           | m.c.a.             | Sobrepresión máxima estimada                                       |
| 10  | Caudal máximo de bombeo          | 10,000           | l.p.s.             |                                                                    |
| 11  | Número de bombas                 | 5                | Equipos            | Se cuenta con un equipo adicional como<br>respaldo                 |
| 12  | Configuración de grupo de bombeo | No aplica        | No aplica          |                                                                    |
| 13  | Escalonamiento de bombeo         | No aplica        | No aplica          |                                                                    |
| 14  | Potencia de bombeo               | 3,676            | HP                 | Por equipo                                                         |
| 15  | Velocidad del rotor de bomba     | 882              | R.P.M.             |                                                                    |
| 16  | Fluido                           | Agua Cruda       | No aplica          |                                                                    |

### 5.2.8.1 Corrida 1: Simulación del flujo transitorio con Hammer sin dispositivos de alivio

De la simulación hidráulica se obtiene que en la mayor parte de la conducción una envolvente de presiones máximas sobrepasa a la presión de trabajo a flujo permanente, y que además rebasa la presión resistente de la tubería. Se obtiene una envolvente de presiones mínimas con valores menores en algunos puntos que los niveles de terreno natural, esto es, se generan presiones negativas.

Por lo anterior, podemos observar que las presiones máximas son ligeramente mayores a la presión máxima de trabajo de la tubería, sin embargo es indispensable considerar la presencia de dispositivos y/o accesorios en la línea de conducción que permitan el control de las depresiones y sobrepresiones mostradas en la figura, verificando que su operación no genere sobrepresiones mayores a las que se producen sin su presencia, además de que las válvulas y accesorios que se utilizarán en la línea de conducción soportan  $25.4 \text{ kg/cm}^2$ , por lo que se procede a analizar las variantes de solución según el accesorio de control que mejor se adecúe. En la figura 5.12 se puede observar gráficamente los resultados obtenidos del modelo.

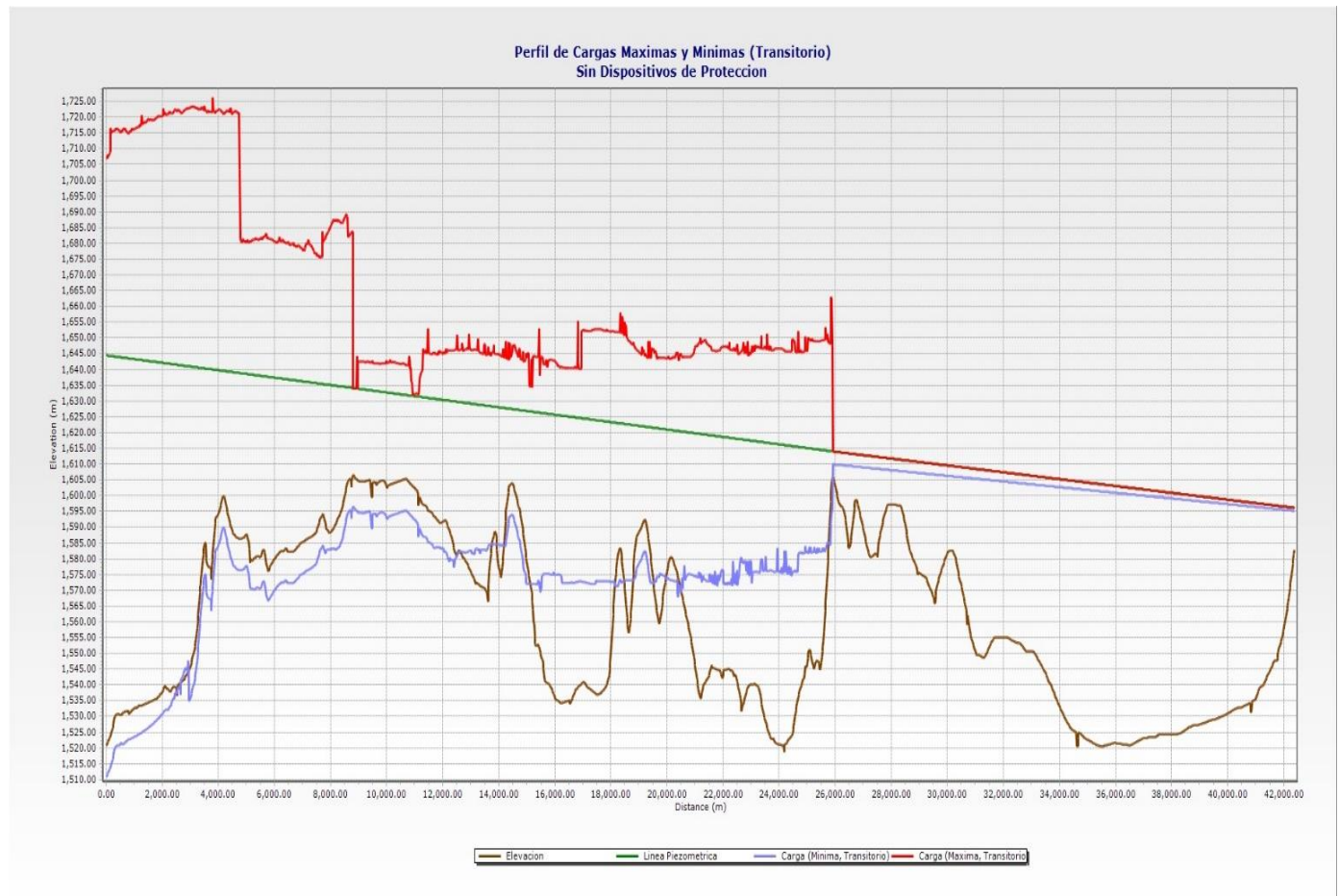


Figura 5.12 Gráfica de cargas Extremas en Línea de Agua Cruda  
Sin Dispositivos de Control con Hammer

Los datos de las envolventes del cálculo del fenómeno transitorio de la Corrida 1 se muestran en la tabla 5.32.

Tabla 5.32 Resultados de la carga hidráulica de trabajo, corrida 1 según Hammer

| Agua Cruda, Paro accidental SIN dispositivos de protección ni VAFEA's |               |                     |                  |                 |                         |                 |                         |                                   |
|-----------------------------------------------------------------------|---------------|---------------------|------------------|-----------------|-------------------------|-----------------|-------------------------|-----------------------------------|
| Nodo                                                                  | Elevación (m) | Cota Hidráulica (m) | Presión (kg/cm²) | Cota Máxima (m) | Presión Máxima (kg/cm²) | Cota Mínima (m) | Presión Mínima (kg/cm²) | Presión que soporta tub. (kg/cm²) |
| n1                                                                    | 1,520.80      | 1,644.53            | 12.37            | 1,719.11        | 19.83                   | 1,520.01        | -0.08                   | 17.57<br>condición<br>normal      |
| n3                                                                    | 1,521.56      | 1,644.48            | 12.29            | 1,718.12        | 19.66                   | 1,520.12        | -0.14                   |                                   |
| n5                                                                    | 1,522.33      | 1,644.44            | 12.20            | 1,705.22        | 18.29                   | 1,518.56        | -0.38                   |                                   |
| n7                                                                    | 1,523.09      | 1,644.39            | 12.12            | 1,706.77        | 18.37                   | 1,520.33        | -0.26                   |                                   |
| n8                                                                    | 1,523.34      | 1,644.37            | 12.10            | 1,707.43        | 18.41                   | 1,520.36        | -0.30                   |                                   |
| n9                                                                    | 1,523.47      | 1,644.37            | 12.08            | 1,706.89        | 18.34                   | 1,520.37        | -0.31                   |                                   |
| n11                                                                   | 1,523.90      | 1,644.34            | 12.04            | 1,703.58        | 17.97                   | 1,520.43        | -0.35                   |                                   |
| n13                                                                   | 1,525.44      | 1,644.29            | 11.88            | 1,700.38        | 17.49                   | 1,520.52        | -0.49                   |                                   |
| n15                                                                   | 1,526.36      | 1,644.25            | 11.78            | 1,700.46        | 17.41                   | 1,520.62        | -0.57                   |                                   |
| n17                                                                   | 1,528.85      | 1,644.20            | 11.53            | 1,697.35        | 16.85                   | 1,520.72        | -0.81                   |                                   |
| n19                                                                   | 1,530.19      | 1,644.15            | 11.39            | 1,697.28        | 16.71                   | 1,520.82        | -0.94                   |                                   |
| n21                                                                   | 1,530.59      | 1,644.11            | 11.35            | 1,694.88        | 16.43                   | 1,520.93        | -0.97                   |                                   |
| n23                                                                   | 1,530.81      | 1,644.06            | 11.32            | 1,695.57        | 16.48                   | 1,521.04        | -0.98                   |                                   |
| n25                                                                   | 1,530.68      | 1,644.01            | 11.33            | 1,696.56        | 16.59                   | 1,521.16        | -0.95                   |                                   |
| n27                                                                   | 1,530.54      | 1,643.96            | 11.34            | 1,700.41        | 16.99                   | 1,521.28        | -0.93                   |                                   |
| n29                                                                   | 1,530.40      | 1,643.92            | 11.35            | 1,707.07        | 17.67                   | 1,521.41        | -0.90                   |                                   |
| n31                                                                   | 1,530.90      | 1,643.87            | 11.29            | 1,716.02        | 18.51                   | 1,521.54        | -0.94                   |                                   |
| n33                                                                   | 1,531.04      | 1,643.82            | 11.27            | 1,699.81        | 16.88                   | 1,521.68        | -0.94                   |                                   |
| n35                                                                   | 1,531.38      | 1,643.78            | 11.23            | 1,718.38        | 18.70                   | 1,521.83        | -0.96                   |                                   |
| n37                                                                   | 1,531.74      | 1,643.73            | 11.19            | 1,711.94        | 18.02                   | 1,521.98        | -0.98                   |                                   |
| n39                                                                   | 1,531.68      | 1,643.68            | 11.19            | 1,711.69        | 18.00                   | 1,522.14        | -0.95                   |                                   |
| n40                                                                   | 1,531.65      | 1,643.66            | 11.19            | 1,721.12        | 18.95                   | 1,522.21        | -0.94                   |                                   |
| n41                                                                   | 1,531.67      | 1,643.65            | 11.19            | 1,721.28        | 18.96                   | 1,522.24        | -0.94                   |                                   |
| n42                                                                   | 1,531.74      | 1,643.63            | 11.18            | 1,710.53        | 17.88                   | 1,522.29        | -0.95                   |                                   |
| n44                                                                   | 1,531.40      | 1,643.59            | 11.21            | 1,730.74        | 19.93                   | 1,522.43        | -0.90                   |                                   |
| n46                                                                   | 1,531.19      | 1,643.54            | 11.23            | 1,717.19        | 18.60                   | 1,522.57        | -0.86                   |                                   |
| n48                                                                   | 1,531.54      | 1,643.49            | 11.19            | 1,696.09        | 16.45                   | 1,522.72        | -0.88                   |                                   |
| n50                                                                   | 1,531.88      | 1,643.44            | 11.15            | 1,699.62        | 16.77                   | 1,522.87        | -0.90                   |                                   |
| n52                                                                   | 1,532.22      | 1,643.40            | 11.11            | 1,714.45        | 18.22                   | 1,523.04        | -0.92                   |                                   |
| n54                                                                   | 1,532.57      | 1,643.35            | 11.07            | 1,695.95        | 16.34                   | 1,523.21        | -0.94                   |                                   |
| n56                                                                   | 1,532.91      | 1,643.30            | 11.03            | 1,696.45        | 16.35                   | 1,523.38        | -0.95                   |                                   |
| n58                                                                   | 1,532.58      | 1,643.26            | 11.06            | 1,699.04        | 16.65                   | 1,523.57        | -0.90                   |                                   |

### 5.2.8.2 Corrida número dos. Paro accidental del equipo de bombeo con cámara de aire en el equipo de bombeo y tanque de Oscilación en Km 8+800

Las cámaras de aire son dispositivos sumamente versátiles y ampliamente utilizados para el control de los transitorios hidráulicos en sistemas de conductos a presión y particularmente en aquellos que involucran estaciones y equipos de bombeo.

Al producirse el paro accidental de las bombas, debido al corte del suministro de energía eléctrica, la cámara de aire actúa de manera prácticamente inmediata sobre la onda de depresión generada, suministrando temporalmente el caudal que ya no es aportado por las bombas, aprovechando para ello la energía acumulada en el aire comprimido ubicado en su interior.

Uno de los parámetros más importantes a determinar en el diseño de la cámara es el volumen inicial de aire que debe contener. A partir de este volumen inicial es posible determinar el volumen máximo que ocupará el aire y, utilizando un factor de seguridad, establecer el volumen total que deberá tener el recipiente (cámara).

De esta manera, se llevó a cabo la simulación correspondiente al funcionamiento de una cámara con un volumen inicial de aire de 101 m<sup>3</sup>. Se muestran los resultados obtenidos, asumiendo una conexión franca entre la cámara de aire y la línea de conducción.

Para representar este dispositivo en el software HAMMER es necesario indicar además del volumen inicial de aire, el volumen Inicial de agua, así como las elevaciones de la base de la cámara y del agua en el interior de la cámara, así como el diámetro de la tubería de conexión cámara-conducción entre otros, en la *Tabla 5.33* se muestra el complemento de la información solicitada para el modelamiento de la cámara de aire.

*Tabla 5.33 Datos de entrada para la cámara de aire en el software Hammer*

| Propiedades físicas                                      | Valor   |
|----------------------------------------------------------|---------|
| Volumen inicial de aire en la cámara (m <sup>3</sup> )   | 101.00  |
| Volumen inicial de agua en la cámara (m <sup>3</sup> )   | 72.20   |
| Altura de agua inicial (m)                               | 2.45    |
| Elevación de la base de la cámara (msnm)                 | 1528.00 |
| Volumen total de la cámara (m <sup>3</sup> )             | 173.20  |
| Longitud de la tubería de conexión cámara-conducción (m) | 20      |
| Diámetro de la tubería de conexión cámara-conducción (m) | 2.65    |

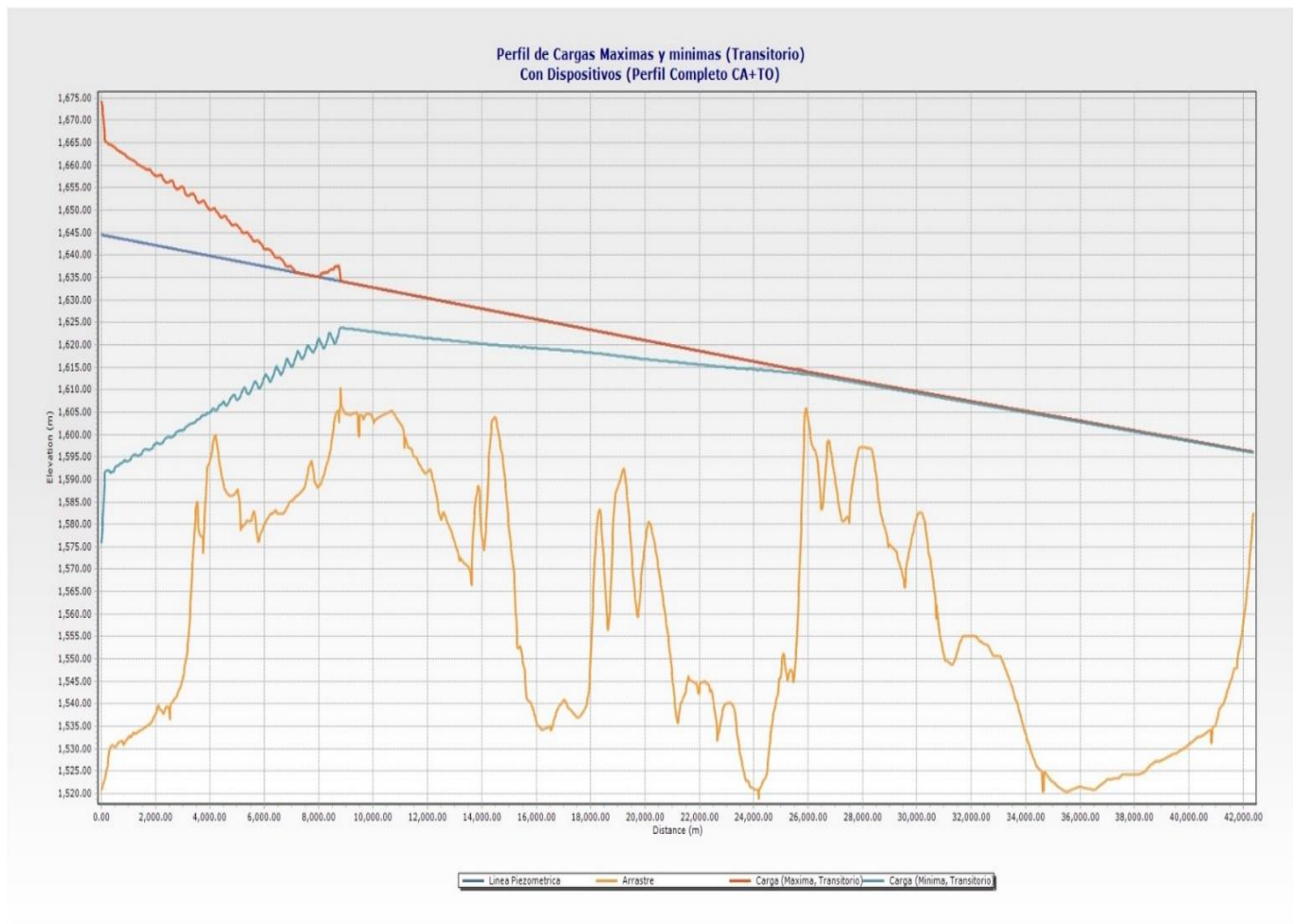
El Tanque de Oscilación, al bajar la presión en la línea, el nivel del agua en el tanque desciende rápidamente, dejando que agua entre a la tubería desde el tanque. Este ingreso de agua compensa la pérdida de presión, evitando que la presión caiga por debajo de la atmosférica. El movimiento del nivel en el tanque crea una oscilación (sube y baja) conforme las ondas de presión rebotan y se estabilizan.



El tanque tiene un diámetro interno de 20.00 m, un tubo de conexión con un diámetro de 106 pulgadas, cota del fondo de 1605.00 m y cota del nivel del agua de 1634.14 m.

De la simulación hidráulica en esta corrida con los elementos para contrarrestar el efecto del fenómeno transitorio se obtiene en los primeros 8.0 Km de conducción una envolvente de presiones máximas que se reduce en relación con la corrida 1, casi igualándose a la presión de trabajo.

Mientras que obtiene una envolvente de presiones mínimas con valores que son mayores a las elevaciones de los tubos en el terreno natural, quedando así resuelta la eliminación de las presiones negativas. Ver Figura 5.13



*Figura 5.13 Gráfica de cargas Extremas en Línea de Agua Cruda  
Corrida dos con Hammer*

Las envolventes del cálculo del fenómeno transitorio de la corrida 2 se muestran en la tabla 5.34

*Tabla 5.34 Resultados de la carga hidráulica de trabajo, corrida dos según Hammer*

| Agua Cruda, Paro accidental CON dispositivos de protección, Cámara de Aire y Tanque Oscilación |               |                     |                               |                 |                                      |                 |                                      |                                                |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|---------------------|-------------------------------|-----------------|--------------------------------------|-----------------|--------------------------------------|------------------------------------------------|
| Nodo                                                                                           | Elevación (m) | Cota Hidráulica (m) | Presión (kg/cm <sup>2</sup> ) | Cota Máxima (m) | Presión Máxima (kg/cm <sup>2</sup> ) | Cota Mínima (m) | Presión Mínima (kg/cm <sup>2</sup> ) | Presión que soporta tub. (kg/cm <sup>2</sup> ) |
| n1                                                                                             | 1,520.80      | 1,644.53            | 12.37                         | 1,666.35        | 14.56                                | 1,579.71        | 5.89                                 | 17.57<br>condición<br>normal                   |
| n3                                                                                             | 1,521.56      | 1,644.49            | 12.29                         | 1,659.60        | 13.80                                | 1,582.62        | 6.11                                 |                                                |
| n5                                                                                             | 1,522.33      | 1,644.44            | 12.20                         | 1,653.18        | 13.09                                | 1,585.67        | 6.33                                 |                                                |
| n7                                                                                             | 1,523.09      | 1,644.39            | 12.12                         | 1,646.69        | 12.36                                | 1,590.25        | 6.72                                 |                                                |
| n8                                                                                             | 1,523.34      | 1,644.37            | 12.10                         | 1,644.58        | 12.12                                | 1,591.80        | 6.85                                 |                                                |
| n9                                                                                             | 1,523.47      | 1,644.37            | 12.08                         | 1,644.57        | 12.11                                | 1,591.38        | 6.79                                 |                                                |
| n11                                                                                            | 1,523.90      | 1,644.34            | 12.04                         | 1,644.54        | 12.06                                | 1,590.33        | 6.64                                 |                                                |
| n13                                                                                            | 1,525.44      | 1,644.29            | 11.88                         | 1,644.50        | 11.91                                | 1,589.57        | 6.41                                 |                                                |
| n15                                                                                            | 1,526.36      | 1,644.25            | 11.78                         | 1,644.45        | 11.81                                | 1,589.44        | 6.31                                 |                                                |
| n17                                                                                            | 1,528.85      | 1,644.20            | 11.53                         | 1,644.40        | 11.56                                | 1,589.75        | 6.09                                 |                                                |
| n19                                                                                            | 1,530.19      | 1,644.15            | 11.39                         | 1,644.36        | 11.42                                | 1,590.16        | 6.00                                 |                                                |
| n21                                                                                            | 1,530.59      | 1,644.11            | 11.35                         | 1,644.31        | 11.37                                | 1,590.92        | 6.03                                 |                                                |
| n23                                                                                            | 1,530.81      | 1,644.06            | 11.32                         | 1,644.26        | 11.35                                | 1,591.37        | 6.06                                 |                                                |
| n25                                                                                            | 1,530.68      | 1,644.01            | 11.33                         | 1,644.22        | 11.35                                | 1,591.95        | 6.13                                 |                                                |
| n27                                                                                            | 1,530.54      | 1,643.97            | 11.34                         | 1,644.17        | 11.36                                | 1,592.59        | 6.20                                 |                                                |
| n29                                                                                            | 1,530.40      | 1,643.92            | 11.35                         | 1,644.12        | 11.37                                | 1,592.91        | 6.25                                 |                                                |
| n31                                                                                            | 1,530.90      | 1,643.87            | 11.29                         | 1,644.08        | 11.32                                | 1,592.76        | 6.19                                 |                                                |
| n33                                                                                            | 1,531.04      | 1,643.82            | 11.27                         | 1,644.03        | 11.30                                | 1,592.06        | 6.10                                 |                                                |
| n35                                                                                            | 1,531.38      | 1,643.78            | 11.23                         | 1,643.98        | 11.26                                | 1,591.45        | 6.01                                 |                                                |
| n37                                                                                            | 1,531.74      | 1,643.73            | 11.19                         | 1,643.94        | 11.22                                | 1,591.34        | 5.96                                 |                                                |
| n39                                                                                            | 1,531.68      | 1,643.68            | 11.19                         | 1,643.89        | 11.22                                | 1,591.79        | 6.01                                 |                                                |
| n40                                                                                            | 1,531.65      | 1,643.66            | 11.19                         | 1,643.86        | 11.22                                | 1,592.06        | 6.04                                 |                                                |
| n41                                                                                            | 1,531.67      | 1,643.65            | 11.19                         | 1,643.85        | 11.22                                | 1,592.20        | 6.05                                 |                                                |
| n42                                                                                            | 1,531.74      | 1,643.63            | 11.18                         | 1,643.84        | 11.21                                | 1,592.43        | 6.07                                 |                                                |
| n44                                                                                            | 1,531.40      | 1,643.59            | 11.21                         | 1,643.79        | 11.24                                | 1,593.13        | 6.17                                 |                                                |
| n46                                                                                            | 1,531.19      | 1,643.54            | 11.23                         | 1,643.74        | 11.26                                | 1,594.31        | 6.31                                 |                                                |
| n48                                                                                            | 1,531.54      | 1,643.49            | 11.19                         | 1,643.70        | 11.22                                | 1,594.62        | 6.31                                 |                                                |
| n50                                                                                            | 1,531.88      | 1,643.45            | 11.15                         | 1,643.65        | 11.18                                | 1,594.32        | 6.24                                 |                                                |
| n52                                                                                            | 1,532.22      | 1,643.40            | 11.11                         | 1,643.60        | 11.14                                | 1,594.03        | 6.18                                 |                                                |
| n54                                                                                            | 1,532.57      | 1,643.35            | 11.07                         | 1,643.56        | 11.10                                | 1,593.77        | 6.12                                 |                                                |
| n56                                                                                            | 1,532.91      | 1,643.30            | 11.03                         | 1,643.51        | 11.06                                | 1,593.68        | 6.08                                 |                                                |
| n58                                                                                            | 1,532.58      | 1,643.26            | 11.06                         | 1,643.46        | 11.09                                | 1,593.87        | 6.13                                 |                                                |

### 5.2.8.3 Corrida número tres. Cierre lento y escalonado de válvulas de control en Km 29+900

El cierre escalonado de las válvulas de control en una conducción a gravedad se utiliza para reducir el riesgo de sobrepresiones y subpresiones durante la maniobra. Al cerrar una válvula de forma gradual y en etapas, se limita la rapidez con la que cambia la velocidad del flujo. Esto disminuye la magnitud del golpe de ariete, ya que la sobrepresión generada es directamente proporcional a la variación súbita de velocidad.

De igual manera, el cierre progresivo evita que se formen depresiones excesivas que puedan llevar el sistema a presiones por debajo de la atmosférica, reduciendo el riesgo de cavitación o ingreso de aire. En conjunto, el cierre escalonado proporciona una transición hidráulica más estable, protege la infraestructura y garantiza un funcionamiento seguro de la línea a gravedad.

La programación del cierre de las válvulas se muestra en la Figura 5.14

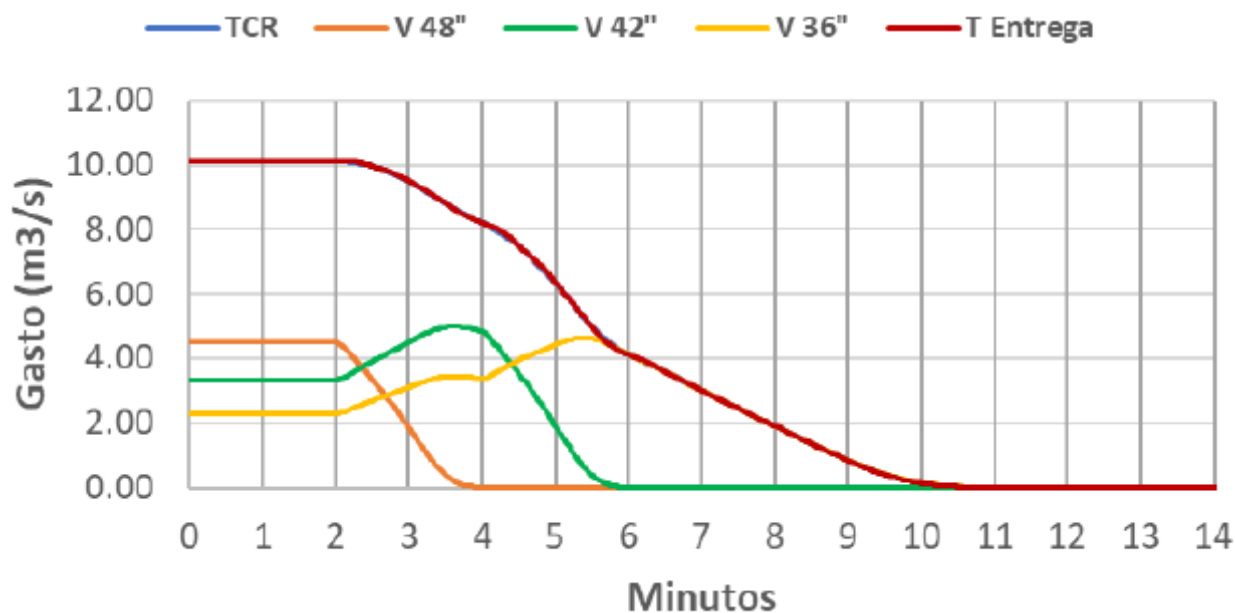


Figura 5.14 Cierre Escalonado por Válvulas de Control para Transitorios Tramo Gravedad

De la simulación hidráulica en esta corrida con el cierre escalonado y con el tiempo suficiente de cierre, el efecto del fenómeno transitorio se obtiene a lo largo de la línea de gravedad una envolvente de presiones máximas que sobrepasa la presión de trabajo, sin sobrepasar la resistencia de la tubería y de las piezas especiales. Además, que se obtiene una envolvente de presiones mínimas con valores que son mayores a las elevaciones de los tubos en el terreno natural, quedando así resuelta la eliminación de las presiones negativas. Lo anterior se puede visualizar en la Figura 5.15

Perfil de Cargas Maximas y Minimas (Transitorio)  
Con Dispositivos (Cierre Valvula)

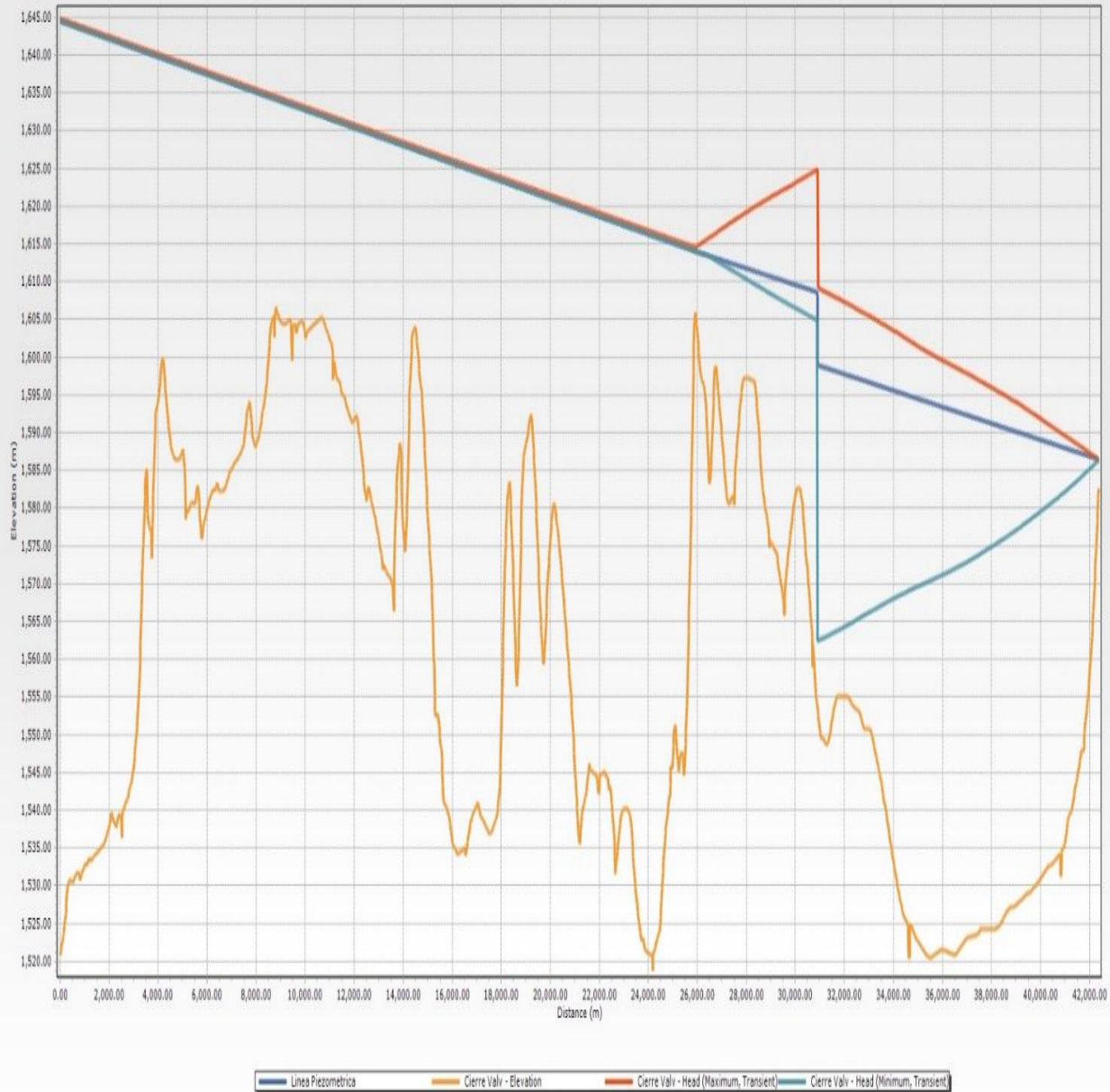


Figura 5.15 Gráfica de cargas Extremas Corrida 3 en Línea a Gravedad con Cierre de Válvula Escalonado



Las envolventes del cálculo del fenómeno transitorio de la corrida 3 se muestran en la tabla 5.35

*Tabla 5.35 Resultados de la carga hidráulica de trabajo, corrida tres según Hammer*

| Agua Cruda, Cierre Programado y Escalonado de Válvulas de Control en Línea de Gravedad |               |                     |                               |                 |                                      |                 |                                      |                                                |
|----------------------------------------------------------------------------------------|---------------|---------------------|-------------------------------|-----------------|--------------------------------------|-----------------|--------------------------------------|------------------------------------------------|
| Nodo                                                                                   | Elevación (m) | Cota Hidráulica (m) | Presión (kg/cm <sup>2</sup> ) | Cota Máxima (m) | Presión Máxima (kg/cm <sup>2</sup> ) | Cota Mínima (m) | Presión Mínima (kg/cm <sup>2</sup> ) | Presión que soporta tub. (kg/cm <sup>2</sup> ) |
| n1361                                                                                  | 1,604.66      | 1,613.98            | 0.93                          | 1,614.68        | 1.00                                 | 1,613.97        | 0.93                                 | 17.57<br>condición<br>normal                   |
| n1364                                                                                  | 1,604.26      | 1,613.93            | 0.97                          | 1,614.87        | 1.06                                 | 1,613.93        | 0.97                                 |                                                |
| n1366                                                                                  | 1,602.50      | 1,613.89            | 1.14                          | 1,615.06        | 1.26                                 | 1,613.88        | 1.14                                 |                                                |
| n1368                                                                                  | 1,600.68      | 1,613.85            | 1.32                          | 1,615.27        | 1.46                                 | 1,613.74        | 1.31                                 |                                                |
| n1370                                                                                  | 1,598.85      | 1,613.80            | 1.49                          | 1,615.47        | 1.66                                 | 1,613.53        | 1.47                                 |                                                |
| n1372                                                                                  | 1,597.55      | 1,613.76            | 1.62                          | 1,615.67        | 1.81                                 | 1,613.33        | 1.58                                 |                                                |
| n1374                                                                                  | 1,597.07      | 1,613.72            | 1.66                          | 1,615.88        | 1.88                                 | 1,613.13        | 1.61                                 |                                                |
| n1376                                                                                  | 1,596.69      | 1,613.67            | 1.70                          | 1,616.08        | 1.94                                 | 1,612.93        | 1.62                                 |                                                |
| n1378                                                                                  | 1,596.31      | 1,613.63            | 1.73                          | 1,616.28        | 2.00                                 | 1,612.72        | 1.64                                 |                                                |
| n1380                                                                                  | 1,595.67      | 1,613.59            | 1.79                          | 1,616.48        | 2.08                                 | 1,612.52        | 1.69                                 |                                                |
| n1382                                                                                  | 1,593.99      | 1,613.54            | 1.95                          | 1,616.68        | 2.27                                 | 1,612.32        | 1.83                                 |                                                |
| n1384                                                                                  | 1,592.30      | 1,613.50            | 2.12                          | 1,616.88        | 2.46                                 | 1,612.12        | 1.98                                 |                                                |
| n1386                                                                                  | 1,588.69      | 1,613.46            | 2.48                          | 1,617.09        | 2.84                                 | 1,611.92        | 2.32                                 |                                                |
| n1388                                                                                  | 1,585.06      | 1,613.41            | 2.83                          | 1,617.29        | 3.22                                 | 1,611.71        | 2.67                                 |                                                |
| n1390                                                                                  | 1,583.26      | 1,613.37            | 3.01                          | 1,617.49        | 3.42                                 | 1,611.51        | 2.83                                 |                                                |
| n1392                                                                                  | 1,584.52      | 1,613.33            | 2.88                          | 1,617.69        | 3.32                                 | 1,611.31        | 2.68                                 |                                                |
| n1394                                                                                  | 1,586.85      | 1,613.28            | 2.64                          | 1,617.89        | 3.10                                 | 1,611.11        | 2.43                                 |                                                |
| n1396                                                                                  | 1,590.36      | 1,613.24            | 2.29                          | 1,618.10        | 2.77                                 | 1,610.91        | 2.05                                 |                                                |
| n1398                                                                                  | 1,594.02      | 1,613.20            | 1.92                          | 1,618.30        | 2.43                                 | 1,610.71        | 1.67                                 |                                                |
| n1400                                                                                  | 1,597.69      | 1,613.15            | 1.55                          | 1,618.51        | 2.08                                 | 1,610.50        | 1.28                                 |                                                |
| n1401                                                                                  | 1,598.60      | 1,613.14            | 1.45                          | 1,618.57        | 2.00                                 | 1,610.43        | 1.18                                 |                                                |
| n1402                                                                                  | 1,598.63      | 1,613.13            | 1.45                          | 1,618.65        | 2.00                                 | 1,610.37        | 1.17                                 |                                                |
| n1404                                                                                  | 1,598.71      | 1,613.09            | 1.44                          | 1,618.83        | 2.01                                 | 1,610.17        | 1.15                                 |                                                |
| n1406                                                                                  | 1,597.56      | 1,613.04            | 1.55                          | 1,619.03        | 2.15                                 | 1,609.97        | 1.24                                 |                                                |
| n1407                                                                                  | 1,597.17      | 1,613.03            | 1.59                          | 1,619.10        | 2.19                                 | 1,609.90        | 1.27                                 |                                                |
| n1408                                                                                  | 1,596.77      | 1,613.02            | 1.62                          | 1,619.17        | 2.24                                 | 1,609.83        | 1.31                                 |                                                |
| n1409                                                                                  | 1,595.99      | 1,613.00            | 1.70                          | 1,619.27        | 2.33                                 | 1,609.73        | 1.37                                 |                                                |
| n1410                                                                                  | 1,595.45      | 1,612.99            | 1.75                          | 1,619.34        | 2.39                                 | 1,609.67        | 1.42                                 |                                                |
| n1411                                                                                  | 1,595.20      | 1,612.98            | 1.78                          | 1,619.37        | 2.42                                 | 1,609.63        | 1.44                                 |                                                |
| n1413                                                                                  | 1,593.63      | 1,612.94            | 1.93                          | 1,619.58        | 2.59                                 | 1,609.43        | 1.58                                 |                                                |
| n1415                                                                                  | 1,592.07      | 1,612.89            | 2.08                          | 1,619.78        | 2.77                                 | 1,609.23        | 1.72                                 |                                                |
| n1417                                                                                  | 1,590.50      | 1,612.85            | 2.23                          | 1,619.99        | 2.95                                 | 1,609.03        | 1.85                                 |                                                |

#### 5.2.8.4 Corrida número cuatro. Paro accidental del equipo de bombeo con cámara de aire en el equipo de bombeo y Tanque de Oscilación en Km 8+800 y Cierre lento y escalonado de válvulas de control en Km 29+900

Se modeló un escenario de paro accidental del equipo de bombeo, considerando la presencia de un tanque hidroneumático (cámara de aire) instalado aguas arriba, en la estación de bombeo, con el fin de amortiguar las sobrepresiones iniciales generadas por la desaceleración repentina del flujo. Adicionalmente, se incluyó un Tanque de Oscilación localizado en el km 8+800 para controlar las variaciones de nivel piezométrico y mitigar posibles subpresiones a lo largo de la línea durante la oscilación hidráulica posterior al paro. Finalmente, se simuló un cierre lento y escalonado de las válvulas de control ubicadas en el km 29+900, con el objetivo de reducir el gradiente de cambio de velocidad del caudal y limitar la magnitud del golpe de ariete, favoreciendo una disipación gradual de las ondas de presión. Este escenario permite evaluar el comportamiento transitorio del sistema considerando protecciones hidráulicas combinadas y maniobras controladas sobre la línea.

De la simulación hidráulica de esta corrida, el efecto del fenómeno transitorio se obtiene a lo largo de la línea de gravedad una envolvente de presiones máximas que sobrepasa la presión de trabajo, sin sobrepasar la resistencia de la tubería y de las piezas especiales y en la impulsión se obtiene en los primeros 8.0 Km de conducción una envolvente de presiones máximas que se reduce en relación con la corrida 1, casi igualándose a la presión de trabajo.

En la línea de gravedad una envolvente de presiones mínimas con valores mayores a las elevaciones de los tubos en el terreno natural, quedando así resuelta la eliminación de las presiones negativas, en la impulsión se obtiene una envolvente de presiones mínimas con valores que son mayores a las elevaciones de los tubos en el terreno natural, quedando así resuelta la eliminación de las presiones negativas. Los valores mostrados individualmente en las corridas 2 y 3 en este caso se presentan a lo largo de toda la línea de conducción. Esto nos permite visualizar el comportamiento general del Acueducto desde la Estación de Bombeo hasta el punto de entrega en el Tanque Cerro del Cuatro lo cual se muestra en la Figura 5.16

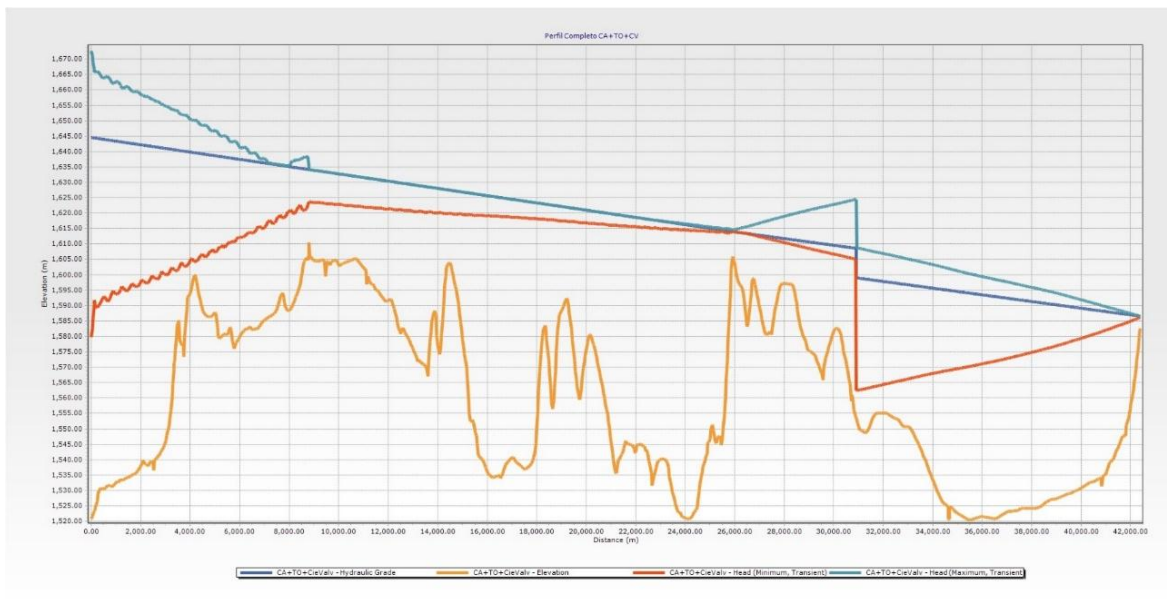


Figura 5.16 Gráfica de cargas Extremas en Línea de Conducción  
Con Paro de Equipo Accidental y Dispositivos de Protección además con Cierre de Válvula Escalonado

Las envolventes del cálculo del fenómeno transitorio se muestran en la tabla 5.36

*Tabla 5.36 Resultados de la carga hidráulica de trabajo, corrida cuatro según Hammer*

| Agua Cruda, Cierre Programado y Escalonado de Válvulas de Control en Línea de Gravedad |                  |                           |                                  |                    |                                            |                    |                                            |                                                      |
|----------------------------------------------------------------------------------------|------------------|---------------------------|----------------------------------|--------------------|--------------------------------------------|--------------------|--------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| Nodo                                                                                   | Elevación<br>(m) | Cota<br>Hidráulica<br>(m) | Presión<br>(kg/cm <sup>2</sup> ) | Cota Máxima<br>(m) | Presión<br>Máxima<br>(kg/cm <sup>2</sup> ) | Cota Mínima<br>(m) | Presión<br>Mínima<br>(kg/cm <sup>2</sup> ) | Presión que<br>soporta tub.<br>(kg/cm <sup>2</sup> ) |
| n1                                                                                     | 2353.28          | 2524.46                   | 17.118                           | 2648.58            | 29.53                                      | 2368.88            | 1.56                                       | 17.57<br>condición<br>normal                         |
| n2                                                                                     | 2355.47          | 2524.39                   | 16.892                           | 2648.62            | 29.315                                     | 2369.27            | 1.38                                       |                                                      |
| n3                                                                                     | 2356.28          | 2524.37                   | 16.809                           | 2647.28            | 29.1                                       | 2368.28            | 1.2                                        |                                                      |
| n4                                                                                     | 2358.31          | 2524.32                   | 16.601                           | 2647.31            | 28.9                                       | 2368.96            | 1.065                                      |                                                      |
| n5                                                                                     | 2358.17          | 2524.17                   | 16.60                            | 2645.17            | 28.7                                       | 2367.47            | 0.93                                       |                                                      |
| n6                                                                                     | 2358.09          | 2524.09                   | 16.60                            | 2643.49            | 28.54                                      | 2365.89            | 0.78                                       |                                                      |
| n7                                                                                     | 2358.00          | 2523.99                   | 16.599                           | 2642.7             | 28.47                                      | 2365.6             | 0.76                                       |                                                      |
| n8                                                                                     | 2357.91          | 2523.89                   | 16.598                           | 2640.61            | 28.27                                      | 2366.21            | 0.83                                       |                                                      |
| n9                                                                                     | 2357.89          | 2523.87                   | 16.598                           | 2638.49            | 28.06                                      | 2365.99            | 0.81                                       |                                                      |
| n10                                                                                    | 2357.87          | 2523.85                   | 16.598                           | 2637.47            | 27.96                                      | 2366.87            | 0.9                                        |                                                      |
| n11                                                                                    | 2357.97          | 2523.84                   | 16.586                           | 2637.57            | 27.96                                      | 2367.87            | 0.99                                       |                                                      |
| n12                                                                                    | 2358.08          | 2523.82                   | 16.575                           | 2636.98            | 27.89                                      | 2368.18            | 1.01                                       |                                                      |
| n13                                                                                    | 2358.37          | 2523.79                   | 16.541                           | 2636.67            | 27.83                                      | 2368.87            | 1.05                                       |                                                      |
| n14                                                                                    | 2359.58          | 2523.63                   | 16.405                           | 2636.28            | 27.67                                      | 2369.78            | 1.02                                       |                                                      |
| n15                                                                                    | 2359.61          | 2523.59                   | 16.398                           | 2634.91            | 27.53                                      | 2369.41            | 0.98                                       |                                                      |
| n16                                                                                    | 2359.68          | 2523.51                   | 16.383                           | 2631.68            | 27.2                                       | 2369.48            | 0.98                                       |                                                      |
| n17                                                                                    | 2360.81          | 2523.38                   | 16.257                           | 2631.61            | 27.08                                      | 2370.71            | 0.99                                       |                                                      |
| n18                                                                                    | 2361.13          | 2523.34                   | 16.221                           | 2631.23            | 27.01                                      | 2372.03            | 1.09                                       |                                                      |
| n19                                                                                    | 2365.13          | 2523.23                   | 15.81                            | 2633.13            | 26.8                                       | 2375.83            | 1.07                                       |                                                      |
| n20                                                                                    | 2369.38          | 2523.11                   | 15.373                           | 2634.48            | 26.51                                      | 2379.88            | 1.05                                       |                                                      |
| n21                                                                                    | 2372.15          | 2523.01                   | 15.086                           | 2631.65            | 25.95                                      | 2379.25            | 0.71                                       |                                                      |
| n22                                                                                    | 2374.01          | 2522.94                   | 14.893                           | 2629.81            | 25.58                                      | 2378.51            | 0.45                                       |                                                      |
| n23                                                                                    | 2374.54          | 2522.92                   | 14.838                           | 2624.74            | 25.02                                      | 2377.74            | 0.32                                       |                                                      |
| n24                                                                                    | 2374.54          | 2522.85                   | 14.831                           | 2623.94            | 24.94                                      | 2377.54            | 0.3                                        |                                                      |
| n25                                                                                    | 2380.9           | 2522.75                   | 14.185                           | 2630.5             | 24.96                                      | 2384.4             | 0.35                                       |                                                      |
| n26                                                                                    | 2391.56          | 2522.61                   | 13.105                           | 2640.46            | 24.89                                      | 2394.86            | 0.33                                       |                                                      |
| n27                                                                                    | 2391.34          | 2522.55                   | 13.121                           | 2631.24            | 23.99                                      | 2388.94            | -0.24                                      |                                                      |
| n28                                                                                    | 2391.26          | 2522.52                   | 13.127                           | 2628.76            | 23.75                                      | 2387.36            | -0.39                                      |                                                      |
| n29                                                                                    | 2393.71          | 2522.39                   | 12.867                           | 2622.11            | 22.84                                      | 2383.71            | -1                                         |                                                      |
| n30                                                                                    | 2394.37          | 2522.35                   | 12.798                           | 2623.57            | 22.92                                      | 2384.97            | -0.94                                      |                                                      |
| n31                                                                                    | 2395.85          | 2522.27                   | 12.641                           | 2624.45            | 22.86                                      | 2386.45            | -0.94                                      |                                                      |
| n32                                                                                    | 2396.91          | 2522.21                   | 12.53                            | 2626.11            | 22.92                                      | 2388.31            | -0.86                                      |                                                      |

### 5.2.8.5 Corrida número cinco. Paro accidental del equipo de bombeo con cámara de aire en el equipo de bombeo y Tanque de Oscilación en Km 8+800, cierre lento y escalonado de válvulas de control en Km 29+900 y cierre de válvula en Tanque de Entrega

A la simulación de la corrida 4 se le agregó el cierre lento de la Válvula de Cierre que se colocará en la llegada al Tanque de Entrega ubicado al final de la línea de conducción.

El procedimiento para la obtención del tiempo de maniobra de cierre para una válvula y evitar una sobrepresión que puede ocasionar daños tanto en la tubería como en las piezas especiales se determina con la fórmula de Michaud:

$$t_M = \frac{2 * L * v}{\Delta H * g}$$

donde:

- $L$  = Longitud de la conducción 11,500 m;
- $v$  = velocidad del agua, 1.67 m/s;
- $g$  = gravedad, 9.81 m/s<sup>2</sup>
- $\Delta H$  = Sobrepresión por cierre de válvula.

Para una primera iteración necesitamos determinar el tiempo crítico con la siguiente formula:

$$t_c = \frac{2 * L}{a} = 25.12 \text{ s}$$

El tiempo de maniobra deberá ser mayor a este tiempo crítico. Por lo que si la presión máxima permisible de la tubería (PMA) es de 17.57 Kg/cm<sup>2</sup>

$$P_{MAX} = (H_g + \Delta H) < PMA$$

Teniendo como  $H_g$  (estática) de 31 mca, podremos tener una sobrepresión de 144.70 mca (14.47 Kg/cm<sup>2</sup>), con lo que obtenemos un  $T_M$  de 27 s, al ser un tiempo cercano al tiempo critico se buscó un mayor tiempo para reducir la presión máxima a 1/3 de la sobrepresión soportada por la tubería.

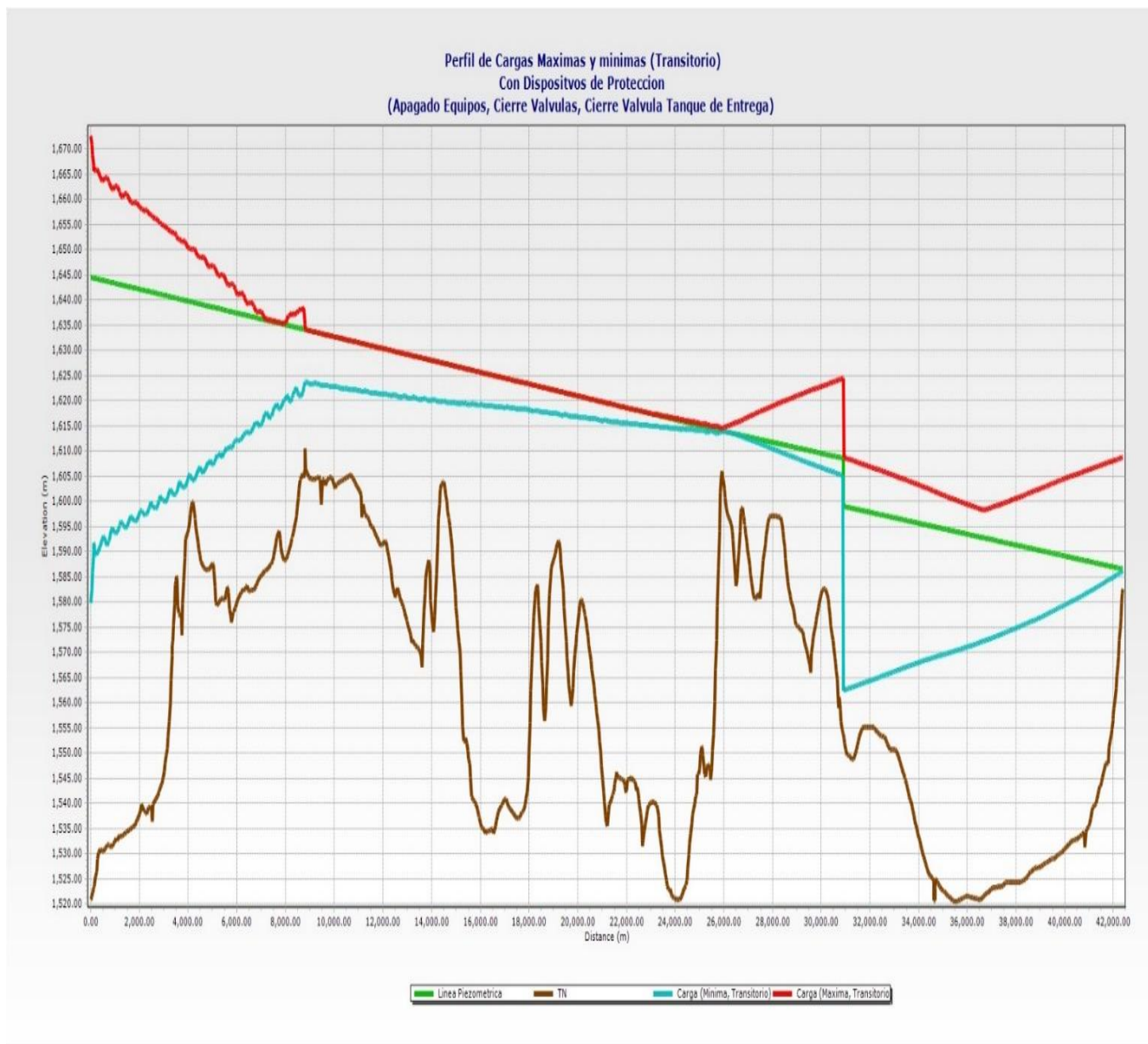
$$t_M = \frac{2 * 11,500 * 1.67}{50.55 * 9.81} = 200 \text{ s}$$

Por lo que el tiempo de cierre sugerido para la válvula en el tanque de entrega es de mínimo 200 seg (00:03:20 min)

De esta simulación hidráulica se obtuvo que se lograra la reducción de la sobrepresión como se muestra en el perfil de la Figura 5.17, además de no influir negativamente en las sobrepresiones de los puntos anteriores los cuales se logra se mantengan dentro de los mismos rangos mostrados en las simulaciones individuales número 2 y número 3 y en conjunto en la corrida 4.



Figura 5.17 Gráfica de cargas Extremas en Línea de Conducción Con Paro de Equipo Accidental y Dispositivos de Protección además con Cierre de Válvula Escalonado en KM 29+900 y Válvula en Tanque de Entrega



Las envolventes del cálculo del fenómeno transitorio se muestran tabuladas en la tabla 5.37.

Tabla 5.37 Resultados de la carga hidráulica de trabajo, corrida cinco según Hammer (Ejemplo)

| Agua Cruda, Cierre Programado y Escalonado de Válvulas de Control en Línea de Gravedad |               |                     |                               |                 |                                      |                 |                                      |                                                |
|----------------------------------------------------------------------------------------|---------------|---------------------|-------------------------------|-----------------|--------------------------------------|-----------------|--------------------------------------|------------------------------------------------|
| Nodo                                                                                   | Elevación (m) | Cota Hidráulica (m) | Presión (kg/cm <sup>2</sup> ) | Cota Máxima (m) | Presión Máxima (kg/cm <sup>2</sup> ) | Cota Mínima (m) | Presión Mínima (kg/cm <sup>2</sup> ) | Presión que soporta tub. (kg/cm <sup>2</sup> ) |
| n2199                                                                                  | 1,542.52      | 1,587.61            | 4.51                          | 1,607.04        | 6.45                                 | 1,583.20        | 4.07                                 | 17.57<br>condición<br>normal                   |
| n2201                                                                                  | 1,543.35      | 1,587.57            | 4.42                          | 1,607.10        | 6.38                                 | 1,583.31        | 4.00                                 |                                                |
| n2203                                                                                  | 1,543.52      | 1,587.55            | 4.40                          | 1,607.14        | 6.36                                 | 1,583.37        | 3.98                                 |                                                |
| n2206                                                                                  | 1,544.30      | 1,587.50            | 4.32                          | 1,607.22        | 6.29                                 | 1,583.50        | 3.92                                 |                                                |
| n2208                                                                                  | 1,545.07      | 1,587.46            | 4.24                          | 1,607.29        | 6.22                                 | 1,583.62        | 3.85                                 |                                                |
| n2210                                                                                  | 1,545.89      | 1,587.42            | 4.15                          | 1,607.36        | 6.15                                 | 1,583.73        | 3.78                                 |                                                |
| n2212                                                                                  | 1,546.72      | 1,587.38            | 4.06                          | 1,607.42        | 6.07                                 | 1,583.85        | 3.71                                 |                                                |
| n2214                                                                                  | 1,547.54      | 1,587.33            | 3.98                          | 1,607.49        | 6.00                                 | 1,583.97        | 3.64                                 |                                                |
| n2215                                                                                  | 1,547.82      | 1,587.32            | 3.95                          | 1,607.52        | 5.97                                 | 1,584.00        | 3.62                                 |                                                |
| n2217                                                                                  | 1,547.82      | 1,587.29            | 3.94                          | 1,607.56        | 5.97                                 | 1,584.08        | 3.63                                 |                                                |
| n2219                                                                                  | 1,547.82      | 1,587.25            | 3.94                          | 1,607.63        | 5.98                                 | 1,584.20        | 3.64                                 |                                                |
| n2221                                                                                  | 1,547.82      | 1,587.21            | 3.94                          | 1,607.69        | 5.99                                 | 1,584.30        | 3.65                                 |                                                |
| n2225                                                                                  | 1,551.11      | 1,587.16            | 3.60                          | 1,607.77        | 5.67                                 | 1,584.43        | 3.33                                 |                                                |
| n2227                                                                                  | 1,552.40      | 1,587.12            | 3.47                          | 1,607.84        | 5.54                                 | 1,584.55        | 3.22                                 |                                                |
| n2229                                                                                  | 1,553.59      | 1,587.07            | 3.35                          | 1,607.90        | 5.43                                 | 1,584.67        | 3.11                                 |                                                |
| n2231                                                                                  | 1,554.78      | 1,587.03            | 3.22                          | 1,607.97        | 5.32                                 | 1,584.79        | 3.00                                 |                                                |
| n2233                                                                                  | 1,556.70      | 1,586.98            | 3.03                          | 1,608.03        | 5.13                                 | 1,584.92        | 2.82                                 |                                                |
| n2234                                                                                  | 1,557.48      | 1,586.97            | 2.95                          | 1,608.06        | 5.06                                 | 1,584.95        | 2.75                                 |                                                |
| n2236                                                                                  | 1,558.65      | 1,586.94            | 2.83                          | 1,608.10        | 4.95                                 | 1,585.04        | 2.64                                 |                                                |
| n2238                                                                                  | 1,560.50      | 1,586.90            | 2.64                          | 1,608.17        | 4.77                                 | 1,585.16        | 2.47                                 |                                                |
| n2240                                                                                  | 1,562.90      | 1,586.85            | 2.39                          | 1,608.24        | 4.53                                 | 1,585.28        | 2.24                                 |                                                |
| n2242                                                                                  | 1,565.34      | 1,586.81            | 2.15                          | 1,608.31        | 4.30                                 | 1,585.40        | 2.01                                 |                                                |
| n2243                                                                                  | 1,566.23      | 1,586.80            | 2.06                          | 1,608.33        | 4.21                                 | 1,585.44        | 1.92                                 |                                                |
| n2245                                                                                  | 1,567.72      | 1,586.77            | 1.90                          | 1,608.37        | 4.07                                 | 1,585.52        | 1.78                                 |                                                |
| n2247                                                                                  | 1,569.29      | 1,586.75            | 1.74                          | 1,608.41        | 3.91                                 | 1,585.58        | 1.63                                 |                                                |
| n2249                                                                                  | 1,572.29      | 1,586.70            | 1.44                          | 1,608.48        | 3.62                                 | 1,585.71        | 1.34                                 |                                                |
| n2251                                                                                  | 1,574.83      | 1,586.67            | 1.18                          | 1,608.54        | 3.37                                 | 1,585.81        | 1.10                                 |                                                |
| n2253                                                                                  | 1,576.79      | 1,586.64            | 0.98                          | 1,608.58        | 3.18                                 | 1,585.89        | 0.91                                 |                                                |
| n2255                                                                                  | 1,579.80      | 1,586.59            | 0.68                          | 1,608.64        | 2.88                                 | 1,586.02        | 0.62                                 |                                                |
| n2257                                                                                  | 1,581.70      | 1,586.57            | 0.49                          | 1,608.68        | 2.70                                 | 1,586.10        | 0.44                                 |                                                |
| n2258                                                                                  | 1,582.67      | 1,586.55            | 0.39                          | 1,608.71        | 2.60                                 | 1,586.14        | 0.35                                 |                                                |
| n2199                                                                                  | 1,542.52      | 1,587.61            | 4.51                          | 1,607.04        | 6.45                                 | 1,583.20        | 4.07                                 |                                                |

### 5.2.8.6 Conclusiones de las simulaciones del fenómeno transitorio

De acuerdo con los resultados que se obtienen de las corridas de simulación del fenómeno transitorio, la Cámara de aire y el Tanque de Oscilación resultan dispositivos adecuados para disipar los efectos de este evento.

Se debe tener en cuenta que estas simulaciones fueron realizadas incluyendo las válvulas de admisión y expulsión de aire que resultaron necesarias para solventar los requerimientos de admisión y expulsión de aire, las cuales son elementos que pueden contribuir también a la protección ante eventos transitorios básicamente por su capacidad de admitir aire que ayuda a prevenir depresiones al interior de la tubería. Por tanto, se contará con esta seguridad adicional en la línea de conducción.

Se recomienda cumplir estrictamente con los tiempos de cierre especificados para las válvulas, evitando maniobras más rápidas de lo indicado. Un cierre fuera del intervalo establecido puede generar sobrepresiones significativas en el acueducto, incrementando el riesgo de golpes de ariete, daños estructurales y fallas en los equipos asociados. Para garantizar la integridad del sistema, todas las operaciones de cierre deberán realizarse conforme al tiempo autorizado en el protocolo operativo.

Con el objetivo de asegurar estabilidad numérica y fidelidad en la propagación de ondas de presión en la modelación transitoria, se adoptó como criterio básico la condición de Courant–Friedrichs–Lewy (CFL), que relaciona el paso de tiempo con la velocidad de propagación de la onda y la longitud característica de la malla hidráulica. Este criterio establece que el frente de onda no debe recorrer más de un tramo por paso de tiempo, evitando pérdidas de precisión y oscilaciones numéricas no físicas en las variables hidráulicas.

Para satisfacer este criterio, la red se normalizó estableciendo una longitud mínima de tramo de 5 m, lo que permite un control adecuado sobre la discretización espacial del modelo. Considerando una celeridad representativa del fluido en la tubería de  $a = 965$  m/s, se obtiene un paso de tiempo máximo compatible con un número de Courant igual a 1:

$$\Delta t_{max} = \frac{5}{968} \approx 0.00518 \text{ s}$$

Por lo anterior, y para mantener el número de Courant menor a la unidad con margen de seguridad, se seleccionó un paso de tiempo  $\Delta t = 0.005$  s. Esta configuración garantiza una adecuada resolución temporal del fenómeno transitorio y estabilidad del esquema numérico a lo largo de toda la conducción.

La selección del paso de tiempo es consistente con los escenarios planteados: paro repentino de bombas por falla eléctrica y tiempos de cierre de válvulas superiores a 100 s. En ambos casos, la dinámica dominante está asociada a periodos relativamente largos respecto al paso de cálculo adoptado, permitiendo capturar de forma precisa la evolución de las presiones, velocidades y oscilaciones transitorias sin pérdida de información relevante ni riesgo de inestabilidad numérica.

### 5.2.9. Ubicación de válvulas de admisión y expulsión de aire

En el acueducto se instalarán válvulas de admisión y expulsión de aire a todo lo largo de la línea de conducción en los puntos altos de la misma, después de las subidas y antes de las bajadas bruscas.

Mediante estas piezas especiales se protegerá el acueducto de posibles estrangulamientos de la sección por acumulación de aire en el interior del tubo que puede llegar a interrumpir, parcial o totalmente, el flujo.

Además, las válvulas de expulsión de aire evitara la posible compresión de este lo que puede llegar multiplicarlo y generar la expulsión súbita de la presión de la bolsa de aire acumulada en la tubería a tal grado que supere la presión resistente de la tubería.

El diámetro de la válvula de expulsión de aire se seleccionó en función del diámetro de la tubería y el gasto que conducirá el tubo del acueducto, aplicando las siguientes reglas empíricas como se muestra en la Tabla 5.38. Para este caso en particular se definió de 10 pulgadas de diámetro.

*Tabla 5.38 Diámetros de las válvulas de admisión y expulsión de aire en función del diámetro de la tubería*

| Diámetro de la tubería (pulgadas) | Diámetro de la válvula (pulgadas) |
|-----------------------------------|-----------------------------------|
| ½ a 4                             | ½                                 |
| 6 a 10                            | 1                                 |
| 12 a 18                           | 2                                 |
| 20 a 24                           | 3                                 |
| 26 a 30                           | 6 a 8                             |
| 32-56                             | 8 a 12                            |

En acueductos de gran longitud y fuertes desniveles topográficos, como es el caso del acueducto Chapala Guadalajara, la presencia de aire atrapado en grandes bolsas puede romper la columna líquida e introduce una discontinuidad en el flujo.

Entre las causas por las que podemos encontrar aire en el interior de un acueducto podemos mencionar las siguientes: presencia de vórtices superficiales en el cárcamo de bombeo, operación de válvulas de admisión de aire, rupturas de la tubería en regiones de presión negativa y liberación del aire disuelto en el agua y además es inevitable que alguna cantidad de aire quede atrapada en la conducción en el curso de su llenado cuando tenemos un perfil irregular.

La presencia de aire en el interior de una tubería ocasiona enormes picos de presión y además de otros problemas como son la reducción de la capacidad de transporte, regímenes de operación no estables, disminución de las tuberías, entre otros.

Con base en las consideraciones anteriores resulta forzoso dotar el acueducto Chapala Guadalajara de medios para conseguir la evacuación del aire. Las válvulas de las ventosas expulsión de aire son utilizadas tanto para eliminar el aire en forma permanente, como para la salida en los puntos altos de las conducciones de grandes cantidades de aire en las operaciones de llenado de las tuberías o, en fin, para introducir aire atmosférico cuando se generan depresiones en la tubería.



En la Tabla 5.39 se muestra la ubicación de las válvulas de admisión y expulsión de aire de la línea de conducción en el tramo por bombeo y por gravedad del acueducto.

*Tabla 5.39 Ubicación de las válvulas de admisión y expulsión de aire*

| CAD       | PRESION NOMINAL |
|-----------|-----------------|
| 0+178.06  | PN16            |
| 2+091.30  | PN16            |
| 4+207     | PN10            |
| 5+605     | PN10            |
| 7+735     | PN10            |
| 10+690    | PN10            |
| 12+110    | PN10            |
| 13+860    | PN10            |
| 14+490    | PN10            |
| 15+400    | PN10            |
| 17+060    | PN16            |
| 18+350    | PN10            |
| 19+220    | PN10            |
| 20+125.56 | PN10            |
| 21+590    | PN10            |
| 23+150    | PN10            |
| 25+095    | PN10            |
| 26+710    | PN10            |
| 28+080    | PN10            |
| 29+030    | PN10            |
| 30+140    | PN10            |
| 31+040    | PN10            |
| 31+980    | PN10            |
| 32+880    | PN10            |
| 33+660    | PN10            |
| 34+680    | PN10            |
| 35+520    | PN10            |
| 36+530    | PN10            |
| 37+520    | PN10            |
| 38+370    | PN10            |
| 39+135.25 | PN10            |
| 39+920    | PN10            |
| 40+800    | PN10            |
| 41+790    | PN10            |

El arreglo tipo de las válvulas de aire se muestran en la figura

### 5.2.10 Atraques

En los trazos de las líneas de conducción y tuberías sometidas a presión, se presentan cambios de dirección y pendiente (cambios de dirección horizontal y vertical) que generan fuerzas axiales que se producen por la operación de la tubería (cargas hidrostáticas, peso de la tubería, efectos de temperatura, efectos dinámicos del agua, entre otros). Por definición, un atraque es un lugar o zona designada para el anclaje o amarre de una tubería, de manera que se nulifiquen las fuerzas generadas por un cambio de dirección en la tubería de conducción. Estos atraques se pueden construir con concreto simple, concreto ciclópeo, concreto armado o de mampostería de piedra.

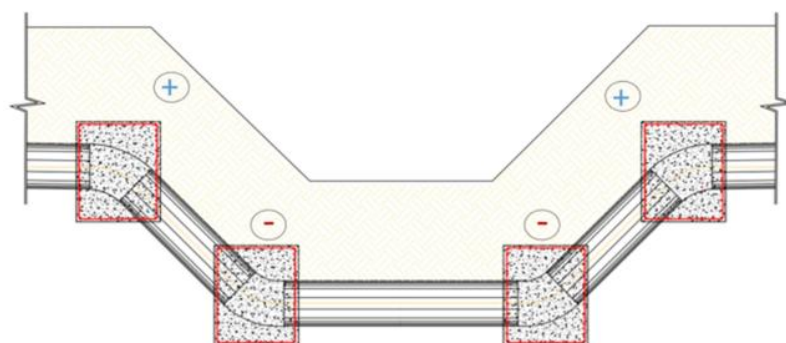


Figura 5.18 Deflexiones verticales positivas y negativas en el trazo de la tubería.

Debido a las deflexiones horizontales y verticales que se presentan en el trazo del proyecto, es una tarea indispensable el determinar el empuje que el flujo del agua genera en ese punto de inflexión. En base a esto, realizaron varios modelos matemáticos con elemento finito con la intención de obtener el nivel de esfuerzos que se generan en los atraques y las reacciones que los mismos transmitirán al subsuelo en el que se coloquen.

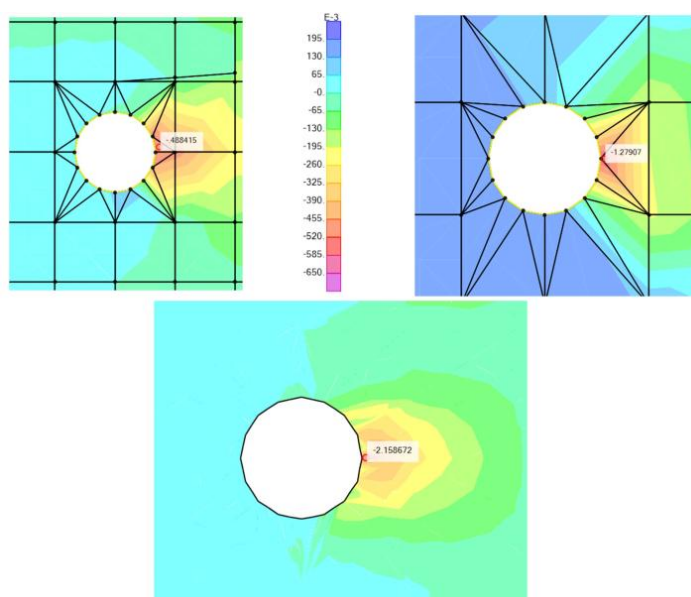


Figura 5.19 Modelación mediante elemento finito de los atraques

A continuación, se despliega el listado de los atraques generados:

Atraques para Deflexiones Horizontales:

- Atraque Tipo 1 : con empujes entre 225 y 190 ton
- Atraque Tipo 2 : con empujes entre 113 y 190 ton
- Atraque Tipo 3 : con empujes entre 96 y 113 ton
- Atraque Tipo 4 : con empujes entre 78 y 96 ton
- Atraque Tipo 5 : con empujes entre 56 y 78 ton
- Atraque Tipo 6 : con empujes entre 56 y 70 ton
- Atraque Tipo 7 : con empujes entre 44 y 56 ton
- Atraque Tipo 8 : con empujes entre 38 y 44 ton
- Atraque Tipo 9 : con empujes entre 31 y 38 ton
- Atraque Tipo 10 : con empujes entre 17 y 31 ton
- Atraque Tipo 11 : con empujes entre 10 y 17 ton
- Atraque Tipo 12 : con empujes entre 7 y 10 ton
- Atraque Tipo 13 : con empujes entre 1 y 7 ton



Tabla 5.40. Dimensiones requeridas según el tipo de atraque horizontal requerido.

| TIPO DE<br>ATRAQUE | DIM. REQUERIDAS |      |      |      |      |      |
|--------------------|-----------------|------|------|------|------|------|
|                    | A               | B    | C    | D    | E    | H    |
| 1                  | 3.50            | 5.00 | 5.50 | 0.50 | 0.50 | 5.40 |
| 2                  | 2.70            | 3.70 | 5.00 | 0.50 | 0.50 | 4.20 |
| 3                  | 2.70            | 3.50 | 4.20 | 0.50 | 0.50 | 4.20 |
| 4                  | 2.70            | 3.25 | 4.00 | 0.50 | 0.50 | 4.00 |
| 5                  | 2.70            | 3.00 | 3.60 | 0.50 | 0.50 | 4.00 |
| 6                  | 2.70            | 3.00 | 3.20 | 0.40 | 0.40 | 3.80 |
| 7                  | 2.70            | 3.00 | 3.15 | 0.40 | 0.40 | 3.50 |
| 8                  | 2.70            | 3.00 | 2.80 | 0.30 | 0.30 | 3.30 |
| 9                  | 2.70            | 3.00 | 2.75 | 0.30 | 0.30 | 3.00 |
| 10                 | 2.70            | 3.00 | 2.60 | 0.30 | 0.30 | 2.90 |
| 11                 | 2.40            | 2.85 | 2.00 | 0.30 | 0.30 | 2.70 |
| 12                 | 2.30            | 2.50 | 1.75 | 0.30 | 0.30 | 2.70 |
| 13                 | 2.00            | 2.25 | 1.50 | 0.30 | 0.30 | 2.70 |

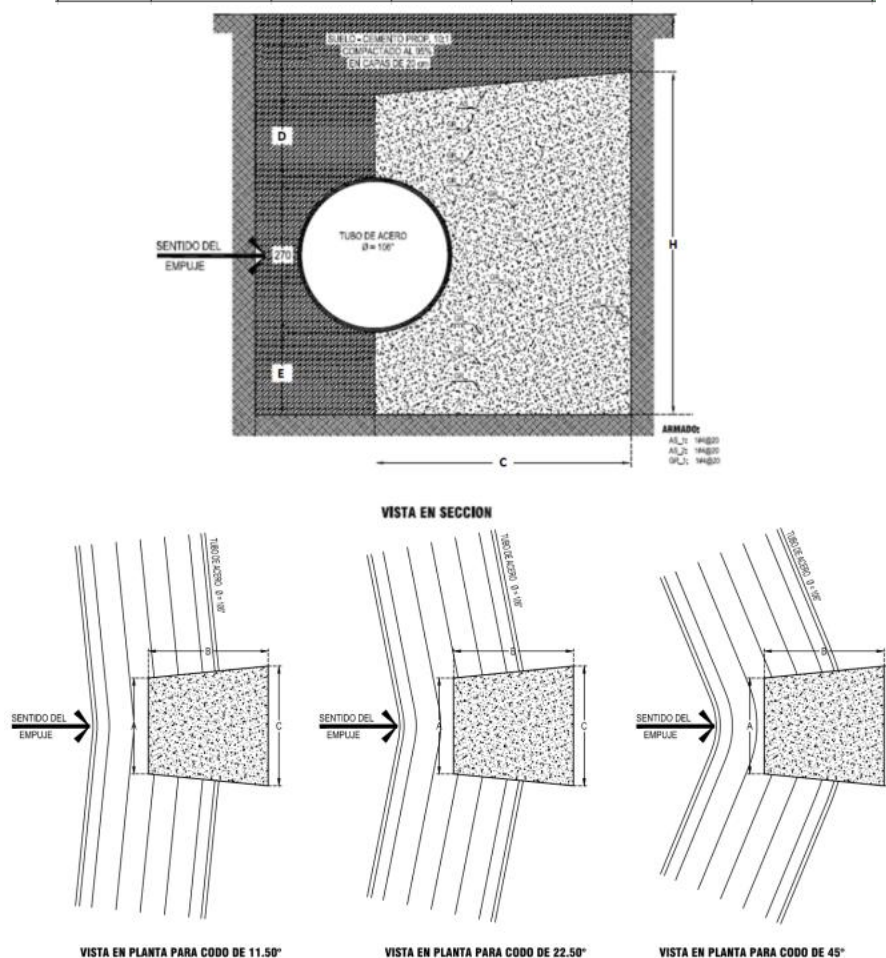


Figura 5.20. Detalle de los atraques horizontales.



### Atraques para Deflexiones Verticales Positivas:

- Atraque Tipo +VA : con empujes entre 1 y 60 ton
- Atraque Tipo +VB : con empujes entre 61 y 140 ton
- Atraque Tipo +VC : con empujes entre 141 y 240 ton
- Atraque Tipo +VD : con empujes entre 241 y 380 ton

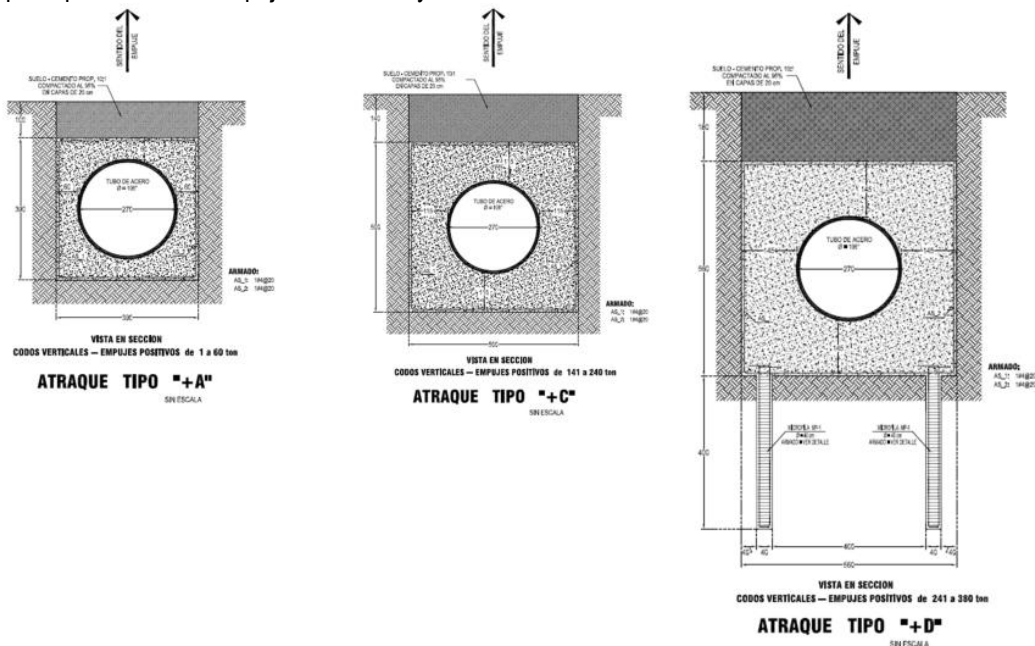


Figura 5.21 Detalle de algunos tipos de atraques para deflexiones verticales positivas.

### Atraques para Deflexiones Verticales Negativas:

- Atraque Tipo -VA : con empujes entre 1 y 95 ton
- Atraque Tipo -VB : con empujes entre 96 y 150 ton
- Atraque Tipo -VC : con empujes entre 151 y 230 ton
- Atraque Tipo -VD : con empujes entre 231 y 300 ton
- Atraque Tipo -VE : con empujes entre 301 y 380 ton

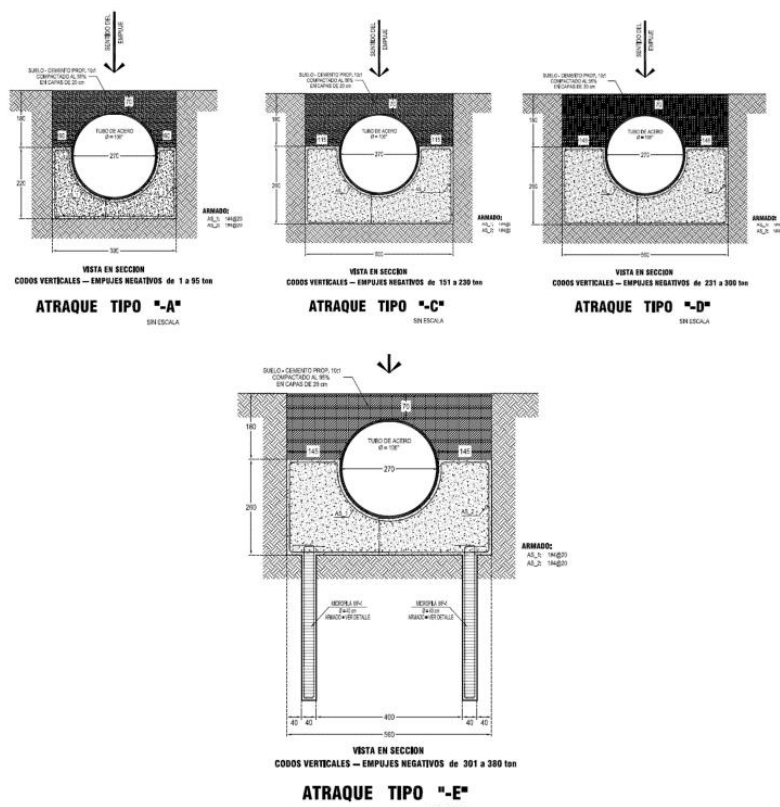


Figura 5.22 Detalle de algunos tipos de atraques para deflexiones verticales negativas.

## 5.2.11 Cruces de Carreteras

Un cruce se entiende, de manera general, como la solución técnica que permite la continuidad física y operativa de una línea de conducción cuando esta intercepta con infraestructuras existentes de alta relevancia, como carreteras, vialidades primarias o estructuras urbanas, garantizando en todo momento la seguridad estructural, la funcionalidad del sistema y la operación ininterrumpida de los elementos que se cruzan. En el trazo del Acueducto Chapala-Guadalajara se presentan cruces con vialidades y carreteras estatales y federales.

Una vez que se presentan estos cruces, resulta una tarea indispensable el diseñar el procedimiento constructivo más adecuado para librar el cruzamiento, así mismo, que obtener los permisos requeridos por la dependencia donde fuera necesario realizar siguientes proyectos. En este proyecto, se resuelven los cruces mediante cepa a cielo abierto o por hincado de la tubería. De esta forma, la generación de un cruce requiere la aplicación de criterios técnicos, normativos y operativos que aseguren su viabilidad desde las etapas de planeación, diseño, construcción y operación. Entre estos criterios se encuentran la selección adecuada del método constructivo, la definición del trazo y su alineamiento y la compatibilidad con el entorno físico y urbano. Estos criterios buscan minimizar afectaciones a la infraestructura existente, reducir riesgos durante la construcción y asegurar un desempeño confiable durante toda la vida útil del proyecto.

El diseño de un cruce involucra la evaluación de diversas variables técnicas fundamentales, entre las que destacan las condiciones topográficas y geométricas del sitio, las características geotécnicas del suelo, la profundidad y geometría de instalación, el tipo y magnitud de las cargas externas e internas, la selección del material y espesor de la tubería, y las condiciones de operación hidráulica. A estas variables se suman factores ambientales, como la posible presencia de agua freática y la agresividad del suelo, así como variables externas asociadas al tránsito vehicular, la sismicidad regional y la interacción con otras infraestructuras existentes.

La correcta integración y análisis de estas variables permite evaluar el comportamiento estructural de la tubería enterrada, considerando aspectos como deflexión, pandeo, esfuerzos combinados y durabilidad frente a fenómenos mecánicos, hidráulicos y ambientales. Este enfoque integral es indispensable para garantizar que el cruce mantenga condiciones adecuadas de seguridad, estabilidad y servicio a lo largo del periodo de diseño y vida útil del proyecto.

La importancia del diseño de cruces radica en que estos puntos representan zonas críticas dentro de los sistemas de conducción, donde una falla puede generar impactos técnicos, económicos, sociales y operativos significativos. Un cruce correctamente analizado y diseñado no solo asegura la continuidad del suministro de agua, sino que también protege infraestructuras estratégicas, reduce riesgos de fallas prematuras, optimiza costos de operación y mantenimiento, y contribuye a la confiabilidad global del sistema hidráulico.

En este contexto, el análisis del cruce se convierte en una herramienta clave para la toma de decisiones técnicas informadas, permitiendo seleccionar soluciones constructivas seguras, eficientes y sustentables, alineadas con los objetivos de largo plazo del proyecto de abastecimiento de agua y con las necesidades actuales y futuras de la población atendida.

*Tabla 5.41 Cantidad de cruces que se presentan a lo largo del trazo del proyecto*

|                          | Impulsión | Gravedad |
|--------------------------|-----------|----------|
| <b>Carretera estatal</b> | 4         | 1        |
| <b>Carretera federal</b> | 1         | 0        |
| <b>FERROMEX</b>          | 0         | 1        |
| <b>TOTAL</b>             | <b>5</b>  | <b>2</b> |
| <b>GRAN TOTAL</b>        | <b>7</b>  |          |

187

## 5.2.12 Cruces de Cauces Federales

En el trazo del Acueducto Chapala-Guadalajara con arroyos pluviales federales se tienen 25 cruces y 7 cruces con canales de riego federales a cargo de la Comisión Nacional del Agua. Con el objeto de obtener los permisos por esta dependencia fue necesario realizar los siguientes proyectos.

### 5.2.12.1 Estudio hidrológico de los arroyos pluviales

Este se realizó para varios periodos de retorno en concordancia con la siguiente normatividad.

Lineamientos para la elaboración de planos de zona federal

Manual de declaratoria, delimitación, demarcación y supresión

Instructivo de hidrología para determinar la avenida máxima ordinaria asociada a la delimitación de la zona federal

La cuenca de aportación pluvial se delimito en base a las cartas topográficas del INEGI, mediante modelos digitales de elevación a escala 1:10,000, el procesamiento de se realizó mediante QGIS, estos planos se generaron con curvas de nivel a cada 10m, donde se indicaron los escurrimientos y de donde se obtuvieron las características del cauce principal como longitud, desnivel y pendiente.

Para el cálculo de la pendiente se utilizó el método de Taylor – Schwarz, este método consiste en calcular la pendiente media del cauce tomando en consideración las variaciones de pendiente que se presenten a lo largo del cauce.

Para obtener el tiempo de concentración se utilizaron las siguientes formulas, se adoptó aquella que tuviera el mínimo tiempo de concentración, siempre y cuando esta fórmula tuviera validez para el tipo de cuenca por aplicar.

Fórmula de Kirpich.

Condicionantes de aplicación: Cuencas con área de 0.004 a 0.45km<sup>2</sup>, pendiente de 3% a 12%, y cuencas del tipo rural.

Fórmula de Rowe.

Condicionantes de aplicación: Cuencas con área de 0.25 a 25km<sup>2</sup>, pendiente de 0.2% a 5%, y cuencas del tipo montaña.

Fórmula de Resources Division FAO.

Condicionantes de aplicación: Cuencas con área de 50 a 200km<sup>2</sup>.

Fórmula BASSO.

Condicionantes de aplicación: Cuencas con área de 20 a 30km<sup>2</sup>, pendiente de 0.005 y cuencas del tipo rural y urbano

Fórmula California Culvert practice.

Condicionantes de aplicación: Cuencas con área de hasta 5km<sup>2</sup>, y cuencas del tipo montaña

Fórmula de Carter.

Condicionantes de aplicación: Cuencas con área de hasta 20.72km<sup>2</sup>, pendientes menores a 0.5% y cuencas del tipo urbanas.

Fórmula de Federal Aviation Administration.

Condicionantes de aplicación: Cuencas con área de hasta 25km<sup>2</sup> y cuencas del tipo urbanas.

Para obtener el número del Coeficiente de Escurrimiento N, se utilizaron las cartas edafológicas escala 1:250 000 Serie III, edición 2024 y para Uso de Suelo. Conjunto de datos vectoriales de la carta de Uso de suelo y vegetación. Escala 1:250 000. Serie VI.



Conjunto Nacional, edición 2017, se añadieron Zonas Urbanas adicionales con imágenes satelitales de 2025 obtenidas de Google Earth.

En las cartas edafológicas encontraremos los tipos de suelo con sus respectivas características físicas y químicas; con las que podremos establecer el grupo de suelo al que pertenecen. Los grupos de suelo se clasifican en A, B, C o D, siendo el grupo A los suelos con mayor permeabilidad y menor cantidad de arcilla, y el grupo D aquellos suelos de menor permeabilidad y con alto contenido de arcilla.

El proceso para la asignación del grupo de suelo es el siguiente:

- 1.- Dentro de la cuenca se delimitan los polígonos de cada tipo de suelo.
- 2.- Cada polígono puede presentar hasta 3 tipos de suelo, con lo cual podríamos decir que cada polígono podría tener hasta 3 grupos de suelo, siendo el grupo uno (G1) el suelo dominante, el grupo dos (G2) el suelo secundario, y el grupo 3 (G3) el suelo terciario. A su vez cada tipo de suelo es acompañado de una o dos unidades calificadoras, conocidos como calificador primario "CP" y calificador secundario "CS".

Dentro de la información incluida por polígono se encuentra la textura representativa de los suelos, la cual es necesaria para asignar un grupo de suelo. La textura presenta una clasificación de tres tipos gruesa (1), media (2), y fina (3) y para cada textura se establecen rangos de contenido de arcilla y arena.

Gruesa (1): Suelos arenosos con más de 70% de arena, con menor capacidad de retención de agua y nutrientes para las plantas.

Media (2): Comúnmente llamados francos, equilibrados en el contenido de arena, arcilla y limo.

Fina (3): Suelos arcillosos con más de 35% de arcilla, que tienen mal drenaje, escasa porosidad, son por lo general duros al secarse, se inundan fácilmente y son menos favorables al laboreo.

Por lo tanto, por polígono podemos tener:

Una textura

Hasta 3 tipos de suelo

Hasta 2 tipos de calificadores ligados a cada tipo de suelo

Conocido lo anterior, se ordena la información de cada polígono dentro de la cuenca y se asigna el grupo de suelo correspondiente a cada tipo de suelo más su calificadora primaria y su textura.

- 3.- Para la asignación de tipo de suelo, se emplea una tabla denominada "Tabla de Decisión". El procedimiento para utilizar la tabla de decisión es el siguiente:

I.- Ubicas el tipo de suelo

II.- A continuación, identificas la unidad calificadora primaria que acompaña al tipo de suelo anteriormente localizado.

III.- Por último, asignas el grupo de suelo con base a la textura de suelo correspondiente al tipo de suelo y se respectiva unidad calificadora.

Una vez que se cuenta con la cuenca delimitada, es necesario localizar las estaciones climatológicas que se consideran tendrán influencia sobre el comportamiento hidrológico de la cuenca, las estaciones se localizan empleando la aplicación de Google Earth de la Comisión Nacional del Agua "Red de Estaciones Climatológicas", las primeras estaciones seleccionadas serán todas aquellas que se localicen dentro de la cuenca y más próximas al parteaguas de esta.

Sin embargo, no todas las estaciones climatológicas son de utilidad, debido a que es necesario que cuenten con cantidad y calidad en la información registrada; según lo establece la Normativa de la Comisión Nacional del Agua para que una estación sea seleccionable deberá contar cuando menos con 20 años de información pluviométrica.

El método de los polígonos de Thiessen se utiliza cuando es necesario determinar la influencia de las estaciones climatológicas sobre las diferentes cuencas, la cual varía según su cercanía a la cuenca y su geometría, en comparación con otras estaciones climatológicas.

El método se aplica cuando se sabe que las medidas de precipitación de los diferentes pluviómetros sufren variaciones. El procedimiento de cálculo es el siguiente:

- 1.- Se unen los pluviómetros adyacentes con líneas rectas (las figuras formadas por las líneas formaran triángulos).
- 2.- Se trazan mediatrices a las líneas que unen los pluviómetros. (Las mediatrices del se encontrarán en un punto dentro triángulo).
- 3.- Se prolongan las mediatrices hasta los límites de las cuencas.
- 4.- Se calculan las áreas formadas dentro de las cuencas formadas por las mediatrices para cada pluviómetro.

Prueba de datos dudosos.

El método del *Water Resources Council* recomienda la realización de ajustes de datos dudosos. Los datos dudosos (*Outliers*) son puntos de la información que se alejan significativamente de la tendencia de la información restante. La retención o eliminación de estos datos puede afectar significativamente la magnitud de los parámetros estadísticos calculados para la información, especialmente en muestras pequeñas.

El método de datos dudosos detecta los valores que se consideran están fuera del rango de los registros históricos como de sus estadísticos. Para el análisis de datos dudosos se realizaron las siguientes consideraciones:

- 1.- Cuando el análisis arroje un dato dudoso alto o bajo en un año completo en sus registros, se revisa y contrasta este comportamiento con el de las estaciones vecinas.
- 2.- Cuando el análisis arroje un dato dudoso bajo del tipo "0" en un año completo, debemos de tener en cuenta que, es muy común que cuando no se cuenta con un dato, este sea considerado como "cero" en vez de "nulo" en las bases de datos de las estaciones. Debido a lo anterior cuando en las estaciones vecinas no se refleje un comportamiento similar a la estación de estudio, se descarta todo el año, ya que esto implica que el registro de todo el año es cero y existe una alta incertidumbre de cuando verdaderamente es cero y cuando no.
- 3.- Cuando se tienen años con registros incompletos, generalmente resultan datos dudosos bajos. Es necesario tener en cuenta si los datos faltantes se presentan en los meses de temporal de lluvia o en el del temporal de estiaje.  
Cuando el dato dudoso bajo resulte en un año que tiene datos incompletos en el temporal de lluvias se deberá esperar a realizar el relleno de datos faltantes para revisar el comportamiento del dato posterior al relleno.  
Cuando el dato dudoso bajo resulte en un año que tiene datos incompletos en el temporal de estiaje, se deberá revisar el comportamiento de las estaciones vecinas para validar que realmente sucedió este fenómeno.
- 4.- Cuando en un año con datos incompletos resulte alto, de igual manera se revisará su comportamiento en comparación con las estaciones vecinas.

En resumen, los datos dudosos que resulten serán descartados o validados mediante el contraste con las estaciones vecinas y con la información de ciclones históricos del Servicio Meteorológico Nacional.

Cada que un dato dudoso sea validado o descartado, se elimina del registro para evaluar nuevamente la base de datos, el procedimiento termina cuando ya no haya datos dudosos, es importante aclarar que los datos que hayan sido validados se deben mantener para las pruebas de homogeneidad e independencia, aquellos que sean eliminados, serán rellenos según el resultado de las pruebas de homogeneidad e independencia.

Homogeneidad e Independencia.

Lo siguiente es determinar el número de datos o bloque histórico al que se le realizaran las pruebas de Independencia y Homogeneidad, considerando que existe la posibilidad de tener datos faltantes. Para la selección del bloque histórico se siguen las siguientes consideraciones, recordando que el dato requerido es el máximo anual:

CEA-PRO-EST-LP-016-25  
PROYECTO EJECUTIVO PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LA INFRAESTRUCTURA  
DEL ACUEDUCTO SUSTITUTO CHAPALA-GUADALAJARA

Si el año tiene registros incompletos, pero sí se tiene información del periodo de lluvias y ciclones, se usa el máximo de ese año.

Si el año tiene registros incompletos, y la información faltante corresponde al periodo de lluvias y ciclones, el máximo de ese año no se toma en cuenta.

Cuando en la serie de datos existen huecos, se selecciona el bloque más largo de años consecutivos sin huecos, siempre y cuando dentro de este bloque se localice el valor máximo de todos los años.

En algunos casos se pueden 'saltar' huecos, siempre y cuando:

- Después del hueco exista un bloque de datos suficientemente largo, por uno o dos años, no se aplica.

- El hueco no sea mayor a tres años seguidos.

Una vez que se define el bloque que se va a analizar, se pueden aplicar las pruebas de independencia y homogeneidad.

Prueba de Independencia.

Para poder realizar el análisis de frecuencias se requiere que la muestra  $x$  de la serie de datos esté compuesta por variables aleatorias, es decir, los elementos de la muestra deben ser independientes entre sí. Para probarlo se aplica la prueba de independencia de Anderson.

El propósito de aplicar la prueba de independencia es determinar que se está trabajando con series temporales independientes entre eventos, es decir, que lo ocurrido en un año no está en función de lo acontecido anteriormente.

Prueba de Homogeneidad.

La homogeneidad estadística indica la estacionalidad de la serie, es decir, que los estadísticos son constantes a lo largo de toda la muestra, de tal forma que se puede garantizar que son representativos respecto a la población, en otras palabras, que no hay tendencia de cambio en su comportamiento.

Las características estadísticas de las series hidrológicas, como la media, la desviación estándar y los coeficientes de correlación serial, se afectan cuando la serie presenta tendencia en la media o varianza, o cuando ocurren saltos negativos o positivos; tales anomalías son producidas por la pérdida de la homogeneidad o la inconsistencia.

La falta de homogeneidad es en general producida por actividades humanas, tales como la deforestación, apertura de nuevas áreas de cultivo, rectificación de cauces, construcción de embalses y reforestación.

Las pruebas estadísticas que miden la homogeneidad de una serie de datos parten de una hipótesis nula y usan una regla para aceptarla o rechazarla. (Fuente: Escalante y Reyes, 2002)

Las pruebas desarrolladas en el presente estudio son las contenidas en el programa AFA del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) y son las siguientes:

Prueba estadística de Helmer

Prueba estadística T de Student

Prueba estadística de Cramer

La serie de datos se considerará homogénea, cuando en la mayoría de las pruebas se confirme la homogeneidad (ninguna prueba es superior a otra).

En el caso de que resulte que una serie de datos no es homogénea, significa que los registros presentan un cambio en su comportamiento, en otras palabras, la serie ya no se comporta como un solo conjunto de datos, sino como si fueran dos grupos distintos. Para identificar si el cambio en el comportamiento de los datos es creciente o decreciente se emplearán las pruebas de Spearman, Man-Kendall y Buishand, esta última además nos permite determinar el punto de quiebre en la serie de registros.

De acuerdo al resultado obtenido (creciente o decreciente), se procede de la siguiente manera:

- Si el resultado muestra un cambio creciente significativo, se puede seguir usando la información de la estación, pero considerando el periodo de retorno ( $T_r$ ) inmediato siguiente.

- Si el resultado muestra un cambio creciente insignificante, se utiliza el  $T_r$  de diseño, ya que probablemente el cambio se deba a que la serie tiene un ciclo incompleto.

- Si el resultado indica un cambio decreciente, ya sea significativo o insignificante, se emplea el Tr de diseño, con lo cual estaríamos del lado de la seguridad

Deducción de datos faltantes.

Para completar datos faltantes de las estaciones climatológicas es necesario utilizar una técnica geoestadística. Para este caso se propuso el Método de interpolación del cuadrado a la distancia inversa (IDW2).

La técnica pertenece a la familia de métodos de distancia pesada. La influencia de la lluvia en una estación para el cálculo de esta en cualquier otro punto es inversamente proporcional a la distancia entre los dos puntos. El método da mayor peso a la estación más cercana y se reduce conforme la distancia es mayor. Para la deducción de datos faltantes se considerará un máximo de 5 estaciones, las cuales deberán localizarse dentro de un radio no mayor a 25km.

### **Funciones de distribución de Probabilidad.**

La estimación de una lluvia a futuro está ligada a una probabilidad de ocurrencia; es por eso que se llevan a cabo mediciones periódicas de los procesos hidrológicos tales como la precipitación. Así con base en el registro histórico de las precipitaciones es posible estimar la magnitud de una lluvia de acuerdo a un tiempo determinado, estos registros presentan variaciones en el espacio y en el tiempo, cuyo comportamiento es en parte predecible y en parte aleatorio.

Una vez que se ha determinado la homogeneidad e independencia de los datos de la muestra, y que se ha realizado la deducción de datos faltantes, es necesario ajustar los datos a una función de distribución de probabilidad.

Una función de distribución de probabilidad representa la probabilidad de ocurrencia de una variable aleatoria en un rango predefinido. Su importancia radica en que es posible la estimación, ya sea como interpolación o extrapolación, de los valores de dicha variable cuando se conoce la probabilidad asociada de ocurrencia o viceversa. Su aplicación en el análisis de registros hidrológicos facilita la reducción de una gran cantidad de datos a una sola función y a sus parámetros asociados, los cuales se derivan de las características estadísticas de la muestra.

Para realizar el ajuste o análisis de frecuencias se empleó el software denominado Análisis de Frecuencia (AFA), desarrollado por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). Dentro de este software se cuenta con 11 Funciones de Distribución de Probabilidad (FDP) que son las siguientes:

- 1.- Distribución Normal
- 2.- Distribución Lognormal de 2 Parámetros
- 3.- Distribución Lognormal de 3 Parámetros
- 4.- Distribución Exponencial de 1 Parámetro
- 5.- Distribución Exponencial de 2 Parámetros o doble exponencial
- 6.- Distribución Gamma de 2 Parámetros
- 7.- Distribución Gamma de 3 Parámetros
- 8.- Distribución Log Pearson Tipo III
- 9.- Distribución General de Valores Extremos (DGVE)
- 10.- Distribución Gumbel
- 11.- Distribución Gumbel Doble

### **Estimación de Parámetros.**

El ajuste consiste básicamente en la estimación de los parámetros de la función de distribución de probabilidad correspondiente. Para la estimación de los parámetros de una función de distribución existen varios métodos, el AFA utiliza los siguientes 3 métodos:

\*Método de momentos.

\*Método de máxima verosimilitud.

\*Método de error cuadrático mínimo.

Es importante señalar que la obtención de los parámetros se realiza mediante los métodos de momentos y de máxima verosimilitud, excepto para la función de distribución de probabilidad (FDP), Gumbel Doble, en la cual se utiliza el método del error cuadrático mínimo cuya ecuación resultante se resuelve mediante el algoritmo de Rosenbrock

### **Selección de la función de distribución de probabilidad.**

El AFA calcula el Error Estándar de Ajuste (EEA) para evaluar la bondad del ajuste de cada una de las funciones de distribución de probabilidad a la serie de datos analizada.

La selección de una de las funciones de distribución se basa en el criterio del mejor ajuste, es decir, se elige aquella que representa los datos de la muestra con mayor precisión reduciendo por consiguiente los errores en las estimaciones.

Se valida como la mejor función la que resulte con un valor menor en el error estándar de ajuste.

### **Factor de corrección por intervalo fijo de observación.**

Cuando se realizan lecturas de precipitación en un único y fijo intervalo de observación, para cualquier duración comprendida entre una hora y 24 horas, es necesario hacer una corrección a dichos valores a través de un factor de corrección por intervalo fijo de observación, dicho factor representa un incremento del 13 por ciento de los valores tomados en campo (World Meteorological Organization, 1973).

Este tipo de corrección se aplica a los registros de lluvia de las estaciones climatológicas debido a que los datos recabados se toman por lo general a las 8:00 horas de la mañana del día siguiente. Con tal corrección (multiplicar por 1.13) la lluvia representativa se convierte en la lluvia máxima de 24 horas de determinado periodo de retorno (Weiss y Wilson, 1958).

### **Curvas de intensidad – duración – periodo de retorno (I-D-Tr).**

Después de determinar las precipitaciones máximas en 24 horas para diferentes periodos de retorno, se procede a la obtención de las curvas intensidad – duración – periodo de retorno.

Para la obtención de las intensidades de lluvia se utilizará la información pluviométrica disponible en nuestro país para una precipitación de 24 horas, aplicando el método de Chen modificado por Campos Aranda para el caso de México.

En la fórmula de Chen se toman en cuenta un cociente de lluvia-duración  $R$ , uno de lluvia-frecuencia  $F$ , el periodo de retorno y la duración de la tormenta.

El cociente  $R$  es la relación entre una lluvia de una hora y una de 24 horas ambas para un periodo de retorno de 2 años. En general los registros de lluvia de cortas duraciones (por ejemplo, de una hora) son bastante escasos. Sin embargo, los registros de lluvias máximas diarias tienen gran densidad y longitudes de registro aceptables, por lo cual la lluvia de una hora de duración podrá ser evaluada con relación al cociente a la de 24 horas con igual periodo de retorno.

El criterio más completo para la determinación de una hora y periodo de retorno 2 años, es el propuesto por el U.S. Weather Bureau y ampliado por B.M. Reich. El criterio se tiene en la siguiente figura tomada del libro de Procesos del ciclo Hidrológico D.F. Campos Aranda.

Con el valor de lluvia máxima diaria media anual ubicado en el eje “x”, se proyecta una línea hasta la curva determinada para el número medio anual de días con tormenta, en el punto donde la línea proyectada intercepta con la curva se proyecta una nueva línea hasta el eje “y” para obtener el valor de la lluvia en una hora periodo de retorno 2 años. El valor de  $R$  es el cociente del valor de lluvia en una hora entre el valor de lluvia en 24 horas para un periodo de retorno de 2 años.



Se calculó el valor de R para todas las estaciones climatológicas identificadas en el proyecto del acueducto, se presentan solo las que tienen influencia en la cuenca del cruce.

Para determinar el valor de R de una cuenca en particular se utilizó el nivel de influencia de cada una de las estaciones en la cuenca de acuerdo a los polígonos de Thiessen obteniendo así una R pondera para la cuenca. Finalmente se obtuvieron las intensidades utilizando la fórmula de Chen aplicada para los diferentes periodos de retorno requeridos.

Factor de reducción por Área (FRA).

Las lluvias obtenidas a través de las curvas I-D-Tr son puntuales y por ello deben ser ajustadas, es decir reducidas, para adecuarlas al tamaño de cuenca en la cual se utilizará la tormenta de diseño, ya que todos los aguaceros son menos intensos entre más área abarcan. El factor de reducción por área (FRA) que se ha utilizado en México con resultados que se consideran aceptables está definido por la siguiente expresión:

$$FRA = 1.0 - 0.3549 * D^{-0.42723} * (1.0 - e^{-0.005794 * A})$$

En el cual, D es la duración de la precipitación en horas y A es el área de cuenca en Km<sup>2</sup>.

Para el cálculo de los gastos de diseño se emplearon 3 métodos hidrológicos los cuales se mencionan a continuación.

#### **Método del hidrograma unitario triangular.**

El método del hidrograma unitario Triangular es uno de los métodos hidrológicos de más amplio rango de aplicabilidad ya que se puede utilizar en cuencas de hasta 2590 km<sup>2</sup>. El U.S. Soil Conservation Service (SCS) dependiente del U.S. Department of Agriculture, planteó en el año de 1957 la posibilidad de representar el hidrograma de respuesta de una cuenca por medio de una figura geométrica simple, el triángulo.

#### **Método de I. Pai – Wu.**

Se basa en el modelo lineal propuesto por Nash, que considera el símil de una cuenca con un sistema “n” vasos lineales iguales, del mismo coeficiente o constante de almacenaje K, colocados en serie.

Conocido el Q<sub>p</sub>, t<sub>p</sub> y n, es posible obtener la forma del hidrograma por la expresión:

$$Q = Q_p \left( \frac{T}{T_p} \right)^{n-1} \left[ e^{-(n-1)} \right] \left( \frac{T}{T_p} - 1 \right)$$

Donde Q es el gasto, en m<sup>3</sup>/s, para un tiempo T (horas), a partir del inicio del hidrograma.

#### **Método del hidrograma sintético Donald M. Gray.**

La técnica del Hidrograma Unitario Sintético propuesta por F.F. Snyder, consiste en resumen en la estimación de los parámetros del hidrograma unitario por medio de una serie de ecuaciones o fórmulas, las cuales fueron deducidas en base al análisis de un gran número de hidrogramas reales.

En base a la curva Tiempo-Area de la cuenca y considerando una velocidad uniforme de precipitación en exceso, el área A que contribuye al gasto en la salida, es proporcional a alguna función del tiempo de recorrido o duración de tormenta.

Partiendo de la ecuación:

El método desarrollado por Donald M. Gray tiene como límite superior de aplicación a un tamaño de cuencas de 243 km<sup>2</sup>.

#### **Gastos de diseño.**

Calculados los gastos de diseño asociados a los diferentes periodos de retorno a través de las diferentes metodologías (I-PAI-WU, D.M. Gray y H.U. Triangular), se procede a realizar la evaluación de los resultados para la selección del gasto de diseño.

El procedimiento establece que inicialmente se adopta el caudal más desfavorable (el de mayor magnitud), dado que este ofrece un mayor grado de seguridad en el diseño hidráulico. Sin embargo, este resultado debe revisarse comparándolo con los otros dos métodos. Posteriormente, es necesario contrastar dicho valor con los resultados obtenidos de los otros dos métodos, a fin de evaluar la coherencia entre ellos. En caso de que el valor más alto presente una discrepancia significativa respecto a los demás, se selecciona el segundo caudal más desfavorable (el inmediatamente inferior), de esta manera, se asegura que el caudal de diseño sea confiable, brinde un aceptable factor de seguridad y evite el sobredimensionamiento de las obras hidráulicas que se proyecten con estos valores.

#### **5.2.12.2.- Análisis hidráulicos de los arroyos y canales de Riego**

El análisis hidráulico de los arroyos se realizó para un periodo de periodo de retorno de 500 años con el objeto de obtener la velocidad y el tirante de agua en la sección de cruce del arroyo o canal con el acueducto y con ello obtener la socavación del fondo del cauce.

Para el caso de los canales de riego se calculó en todo el tramo de estudio considerando unos centímetros antes de que el canal desbordara, bajo este esquema se obtuvo el gasto que puede conducir este canal de Riego, los cuales además de conducir agua para regar terrenos de cultivo, también reciben agua pluvial dado que los terrenos colindantes a estos canales aportan agua pluvial a estos canales, inclusive existen canales de riego que reciben agua pluvial de drenes parcelarios.

Para realizar estos cálculos hidráulicos se utilizó el software HEC-RAS, el cual es un programa computacional desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros del ejército de Estados Unidos, especializado en la simulación hidráulica de flujos uniformes unidimensionales, flujos variados unidimensionales y bidimensionales, modelación de manchas de inundación, al igual que transporte de sedimentos y monitoreo de calidad de agua.

Para hacer el análisis hidráulico se utilizó la información del levantamiento topográfico realizado, el cual consiste en un archivo tipo DWG que contiene curvas de nivel a cada 0.20 metros del cual se generó la geometría de las secciones que fueron introducidas al software para el cálculo.

Para calcular el coeficiente de rugosidad de Manning se utilizó el método de Cowan. Esta metodología se basa en dar una puntuación con base a la descripción de cada variable, y aplicar la siguiente ecuación.

$$n = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4) * m_5$$

Donde:

$n$  = coeficiente de rugosidad (Manning)

$n_0$  = Características del canal

$n_1$  = Grado de irregularidad

$n_2$  = Variaciones de la sección transversal (forma y tamaño)

$n_3$  = Obstrucciones al área hidráulico

$n_4$  = Cantidad y tipo de vegetación

$m_5$  = Grado de sinuosidad

### 5.2.12.3.- Delimitación de zona federal de los arroyos federales y delimitación de zona de protección de los canales de riego.

De acuerdo con la Ley de Aguas Nacionales, artículo 3, sección XLVII: "Las fajas de diez metros de anchura contiguas al cauce de las corrientes o al vaso de los depósitos de propiedad nacional, medidas horizontalmente a partir del nivel de aguas máximas ordinarias. La amplitud de la ribera o zona federal será de cinco metros en los cauces con una anchura no mayor de cinco metros. El nivel de aguas máximas ordinarias se calculará a partir de la creciente máxima ordinaria que será determinada por "la Comisión" o por el Organismo de Cuenca que corresponda, conforme a sus respectivas competencias, de acuerdo con lo dispuesto en los reglamentos de esta Ley. En los ríos, estas fajas se delimitarán a partir de cien metros río arriba, contados desde la desembocadura de éstos en el mar. En los cauces con anchura no mayor de cinco metros, el nivel de aguas máximas ordinarias se calculará a partir de la media de los gastos máximos anuales producidos durante diez años consecutivos. Estas fajas se delimitarán en los ríos a partir de cien metros río arriba, contados desde la desembocadura de éstos en el mar. En los orígenes de cualquier corriente, se considera como cauce propiamente definido, el escurrimiento que se concentre hacia una depresión topográfica y forme una cárcava o canal, como resultado de la acción del agua fluyendo sobre el terreno. La magnitud de la cárcava o cauce incipiente deberá ser de cuando menos de 2.0 metros de ancho por 0.75 metros de profundidad."

Adicionalmente al análisis hidráulico de 500 años, calculado para la socavación se realizó el cálculo para un periodo de retorno de 5 años, con el objeto de calcular el ancho del espejo del agua para la delimitación de zona federal, una vez plasmado en planta la zona federal se realizaron cuadros de construcción de la margen izquierda y de la margen derecha de cada uno de los cauces, los tirantes de agua se plasmaron en secciones topográficas cada 20m y puntos de inflexión de los cauces, así como en un perfil en donde se indica el nivel del agua, el fondo del cauce y la margen izquierda y derecha del propio cauce.

Una vez realizado estos planos se ingresaron a la Comisión Nacional del Agua para que esta dependencia validara y firmara los planos de las zonas federales de los arroyos y de la zona de protección de los canales de riego.

### 5.2.12.4.- Cálculo de la profundidad de socavación

Con el objeto de conocer la profundidad de socavación de los arroyos y canales de riego se realizó el análisis hidráulico para un periodo de retorno de 500 años, además se realizó una revisión para alguna condición más desfavorable en socavación, las cuales consistieron en verificar si para otros niveles del agua en los arroyos o canales existía una velocidad pudiera ocasionar una mayor socavación a la de 500 años, sobre todo esta condición se presentó cuando los arroyos desbordaban y el área hidráulica aumentaba y la velocidad disminuía, para el caso de los canales de riego se consideró unos centímetros antes de que desbordara el canal en todo el tramo de topografía levantado y que tenía influencia sobre la estructura de cruce.

Para el cálculo de socavación se consideró la estratigrafía del suelo en el sondeo más cercano al sitio de cruce, considerando para ello el peso específico y el diámetro medio de las partículas para cada una de las capas de suelo existente en la zona del cruce del acueducto con estos cuerpos de agua.

Para su cálculo se utilizó el método de Lischtván - Lebediev, el cual está basado en determinar la condición de equilibrio entre la velocidad media de la corriente y la velocidad media del flujo que se requiere para erosionar un material de diámetro y densidad conocidos. Se aplica tanto si la distribución del material del subsuelo es homogénea, como si es heterogénea, es decir formando estratos de distintos materiales.

La condición de equilibrio está dada por:

$$U_e = U_r$$

Donde:

$U_e$  = Velocidad media que debe tener la corriente para erosionar al material del fondo (inicio del arrastre), en m/s.

$U_r$  = Velocidad media real de la corriente, en m/s.

Para poder aplicar el método se requieren los datos siguientes, que son relativamente fáciles de obtener:

El gasto máximo de diseño,  $Q_d$ . Elevación del agua en el río (en la sección en estudio) para el gasto anterior. La sección transversal de la sección en estudio obtenida durante el estiaje anterior. Si el suelo es granular, se necesita la granulometría del material del fondo, de donde se calcula el diámetro medio,  $D_m$ . Si el suelo es cohesivo, se deberá obtener el peso volumétrico  $\gamma_s$  de la muestra seca.

Cálculo de  $U_r$  La hipótesis fundamental consiste en suponer que el gasto unitario que pasa por cualquier franja de la sección permanece constante mientras dura el proceso en erosión.

Se obtiene así que para cualquier profundidad que se haya alcanzado,  $U_r$ .

$$U_r = \frac{\alpha d_o^{5/3}}{d_s}$$

Donde:

$d_o$  = Profundidad inicial que existe en una determinada vertical de la sección entre el nivel del agua al pasar la avenida y el nivel del fondo obtenido durante el estiaje, en m.

$d_s$  = Profundidad después de producirse la socavación del fondo. Se mide desde el nivel del agua al pasar la avenida hasta el nivel del fono erosionado, en m.

$\alpha$  = Coeficiente que se deduce a partir de los datos, mediante la expresión

$$\alpha = \frac{Q_d}{d_m^{5/3} B_e \mu}$$

$B_e$  = Ancho efectivo en la sección, descontados todos los obstáculos, en m para encontrar  $B_e$ , se traza una línea perpendicular a las líneas de corriente. Sobre esa línea se proyectan todos los obstáculos y  $B_e$  es la suma de todos los espacios libres. Así se toma en cuenta además al esviamiento de la corriente.

$D_m$  = Tirante medio de la sección; el cual se obtiene dividiendo el área hidráulica entre el ancho efectivo, en m.

$\mu$  = Coeficiente que toma en cuenta el efecto de contracción producido por las pilas en el caso de existir un puente.

Tabla 5.42 Coeficientes de Contracción

| Coeficiente de Contracción |                                         |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|----------------------------|-----------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Velocidad                  | Longitud libre entre pilas (claro) en m |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| (m/s)                      | 10                                      | 13   | 16   | 18   | 21   | 25   | 30   | 42   | 52   | 63   | 106  | 124  | 200  |
| < 1.0                      | 1.00                                    | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| 1.0                        | 0.96                                    | 0.97 | 0.98 | 0.98 | 0.99 | 0.99 | 0.99 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| 1.5                        | 0.94                                    | 0.96 | 0.97 | 0.97 | 0.97 | 0.98 | 0.99 | 0.99 | 0.99 | 0.99 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| 2.0                        | 0.93                                    | 0.94 | 0.95 | 0.96 | 0.97 | 0.97 | 0.98 | 0.98 | 0.99 | 0.99 | 0.99 | 0.99 | 1.00 |
| 2.5                        | 0.90                                    | 0.93 | 0.94 | 0.95 | 0.96 | 0.96 | 0.97 | 0.98 | 0.98 | 0.99 | 0.99 | 0.99 | 1.00 |
| 3.0                        | 0.89                                    | 0.91 | 0.93 | 0.94 | 0.95 | 0.96 | 0.96 | 0.97 | 0.98 | 0.98 | 0.99 | 0.99 | 0.99 |
| 3.5                        | 0.87                                    | 0.90 | 0.92 | 0.93 | 0.94 | 0.95 | 0.96 | 0.97 | 0.98 | 0.98 | 0.99 | 0.99 | 0.99 |
| >4.0                       | 0.85                                    | 0.89 | 0.91 | 0.92 | 0.93 | 0.94 | 0.95 | 0.96 | 0.97 | 0.98 | 0.99 | 0.99 | 0.99 |

Cálculo de  $U_e$ .

La velocidad mínima necesaria para arrastrar los materiales depende de la naturaleza de los mismos.

Para suelos no cohesivos:

$$U_e = 0.68 D_m^{0.28} \beta d_s^x$$

Para suelos cohesivos:

$$U_e = 0.60 \gamma_s^{1.18} \beta d_s^x$$

Donde:

$\beta$  = Coeficiente que toma en cuenta el periodo de retorno con que se presenta el gasto de diseño.

Tabla 5.43 Coeficientes Beta

| CALCULO DE BETA ( $\beta$ ) |                     |
|-----------------------------|---------------------|
| Periodo de<br>retorno       | Coeficiente<br>Beta |
| 1                           | 0.77                |
| 2                           | 0.82                |
| 5                           | 0.86                |
| 10                          | 0.90                |
| 20                          | 0.94                |
| 50                          | 0.97                |
| 100                         | 1.00                |
| 500                         | 1.05                |
| 1000                        | 1.07                |

X = Exponente variable que tiene diferente valor en cada una de las fórmulas. En la fórmula para suelos no cohesivos, su valor depende de  $D_m$  en mm, y para suelos cohesivos depende del peso volumétrico,  $\gamma_s$ , en ton/m<sup>3</sup>. Dados a continuación:

CEA-PRO-EST-LP-016-25  
PROYECTO EJECUTIVO PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LA INFRAESTRUCTURA  
DEL ACUEDUCTO SUSTITUTO CHAPALA-GUADALAJARA



Tabla 5.44 Factor X para suelos cohesivos

| Tabla del factor X para Suelos Cohesivos |      |            |      |            |      |            |      |
|------------------------------------------|------|------------|------|------------|------|------------|------|
| $\gamma_s$                               | X    | $\gamma_s$ | X    | $\gamma_s$ | X    | $\gamma_s$ | X    |
| ton/m3                                   |      | ton/m3     |      | ton/m3     |      | ton/m3     |      |
| 0.80                                     | 0.52 | 0.98       | 0.45 | 1.24       | 0.38 | 1.64       | 0.31 |
| 0.83                                     | 0.51 | 1.00       | 0.44 | 1.28       | 0.37 | 1.71       | 0.30 |
| 0.86                                     | 0.50 | 1.04       | 0.43 | 1.34       | 0.36 | 1.80       | 0.29 |
| 0.88                                     | 0.49 | 1.08       | 0.42 | 1.40       | 0.35 | 1.89       | 0.28 |
| 0.90                                     | 0.48 | 1.12       | 0.41 | 1.46       | 0.34 | 2.00       | 0.27 |
| 0.93                                     | 0.47 | 1.16       | 0.40 | 1.52       | 0.33 |            |      |
| 0.96                                     | 0.46 | 1.20       | 0.39 | 1.58       | 0.32 |            |      |

Tabla 5.45 Factor X para suelos no cohesivos

| Tabla del factor X para Suelos No Cohesivos |      |      |      |     |      |      |      |
|---------------------------------------------|------|------|------|-----|------|------|------|
| Dm                                          | X    | Dm   | X    | Dm  | X    | Dm   | X    |
| mm                                          |      | mm   |      | mm  |      | mm   |      |
| 0.05                                        | 0.43 | 6.0  | 0.36 | 60  | 0.29 | 450  | 0.22 |
| 0.15                                        | 0.42 | 8.0  | 0.35 | 90  | 0.28 | 570  | 0.21 |
| 0.5                                         | 0.41 | 10.0 | 0.34 | 140 | 0.27 | 750  | 0.20 |
| 1.0                                         | 0.40 | 15.0 | 0.33 | 190 | 0.26 | 1000 | 0.19 |
| 1.5                                         | 0.39 | 20.0 | 0.32 | 250 | 0.25 |      |      |
| 2.5                                         | 0.38 | 25.0 | 0.31 | 310 | 0.24 |      |      |
| 4.0                                         | 0.37 | 40.0 | 0.30 | 370 | 0.23 |      |      |

Cálculo de la socavación,  $d_s$ , para suelos homogéneos. Conocido el tipo de suelo que existe en el sitio y suponiendo que la rugosidad es constante toda la sección, la profundidad hasta la que llegará la socavación se obtiene al igualar los valores de  $U_e$  y  $U_r$

Para suelos granulares:

$$d_s = \left( \frac{\alpha d_0^{5/3}}{0.60 D_m^{0.28} \beta} \right) \frac{1}{(1+x)}$$

Para suelos cohesivos:

$$d_s = \left( \frac{\alpha d_0^{5/3}}{0.60 \gamma_s^{1.18} \beta} \right) \frac{1}{(1+x)}$$

Cálculo de la socavación,  $d_s$ , para suelos heterogéneos. Cuando la distribución de los materiales en el subsuelo es heterogénea, es posible encontrar la profundidad de la erosión en cada vertical.

Si se cuenta con la distribución estratigráfica de los materiales bajo una vertical, se escoge el manto superior y, de acuerdo con la naturaleza del material, se aplica una de las dos fórmulas del inciso 1. Si la profundidad  $d_s$  obtenida, queda abajo del límite inferior del manto, se escoge el segundo estrato y se repite el tanteo anterior con la fórmula correspondiente al tipo del suelo de ese segundo estrato. En el primer tanteo en que la profundidad  $d_s$  calculada esté dentro del estrato en estudio, se habrá obtenido la  $d_s$  buscada.

Si el valor de  $D_s$  es menor al límite superior, el estrato no sufre socavación.

Si el valor de  $D_s$  es mayor al límite superior y menor al límite inferior, el estrato sufre socavación, a tanta profundidad como marque el valor arrojado por el mismo  $D_s$  del estrato.

Si el valor de  $D_s$  es mayor tanto al límite superior, como al límite inferior, el estrato completo sufre socavación y por tanto se procede a hacer el análisis para el siguiente estrato.

Al tener los valores de socavación para cada punto de la sección se grafican los puntos obteniendo como resultado la sección del terreno socavado:

#### 5.12.2.5.- Proyecto de estructura de cruce

Una vez obtenida la socavación se procedió a dejar un colchón por abajo de esta socavación (aproximadamente 40cm), en esta zona se encofro la tubería de acero en concreto, posteriormente se pusieron un codo para volver a subir al nivel normal del acueducto, en estos codos se calculó un atraque de concreto para proteger a la tubería del empuje hidrodinámico del agua por el cambio de dirección de la tubería, después de este atraque se colocaron las válvulas de desfogue en caso de haberse requerido este tipo de válvulas en esa zona.

Se realizaron 32 planos de estas estructuras de cruces en donde se indican las dimensiones de los atraques, ubicación de codos y ubicación de válvulas de desfogue, así como la socavación de proyecto que habrá en cada uno de los cruces. Adicional a estos planos se realizaron 32 planos del cálculo de la socavación en estos cruces.

Además, se dejaron 32 archivos digitales para integrar los permisos de obra del cruce del Acueducto Chapala-Guadalajara con estos cauces y canales federales, lo anterior en apego a los lineamientos de la Ley de Aguas Nacionales y de su Reglamento vigente a la fecha de elaboración del presente estudio.

### 5.2.13 Protección catódica

El objetivo de la protección catódica es suministrar la corriente adecuada a la estructura a proteger para que alcance un nivel adecuado de polarización catódica. El sistema de protección catódica consistirá en 4 camas de pozo profundo de 12 ánodos cada una. Se deberá suministrar cuatro rectificadores Marca “*Universal Rectifiers*”, Modelo ASAI-100-100-HCIR.

La supervisión y/o instalación se realizará con personal con certificación NACE/AMPP CP-2 *Cathodic Protection Technician*, garantizando así la correcta ejecución del proyecto.

Los postes deberán colocarse en sitios donde no se ponga en riesgo su integridad, los cruces de alta tensión y los cruces con gasoductos se deberá mantener su instalación al sitio más aproximado al cruce y los postes de kilometraje podrán sufrir modificaciones en su odómetro de instalación bajo la premisa de que no sufran daños por construcciones futuras.

Se deberá colocar un par bridado superficial, para la instalación de las juntas de aislamiento en los siguientes puntos:

Km 0+000, antes de la interfase ducto-electrolito, después de todas las interconexiones de los bombeos, el diámetro considerado deberá ser 106” o del diámetro que marque la ingeniería del ducto.

Km 8+780, antes de la llegada al tanque de oscilación, el diámetro considerado deberá ser 106”.

Km 25+880, antes de la llegada al tanque de cambio de régimen, el diámetro considerado deberá ser 106”.

Km 26+940, después de la salida del tanque de cambio de régimen, el diámetro considerado deberá ser 106”.

Km 42+315, antes de la llegada al tanque de entrega, el diámetro considerado deberá ser 106”.

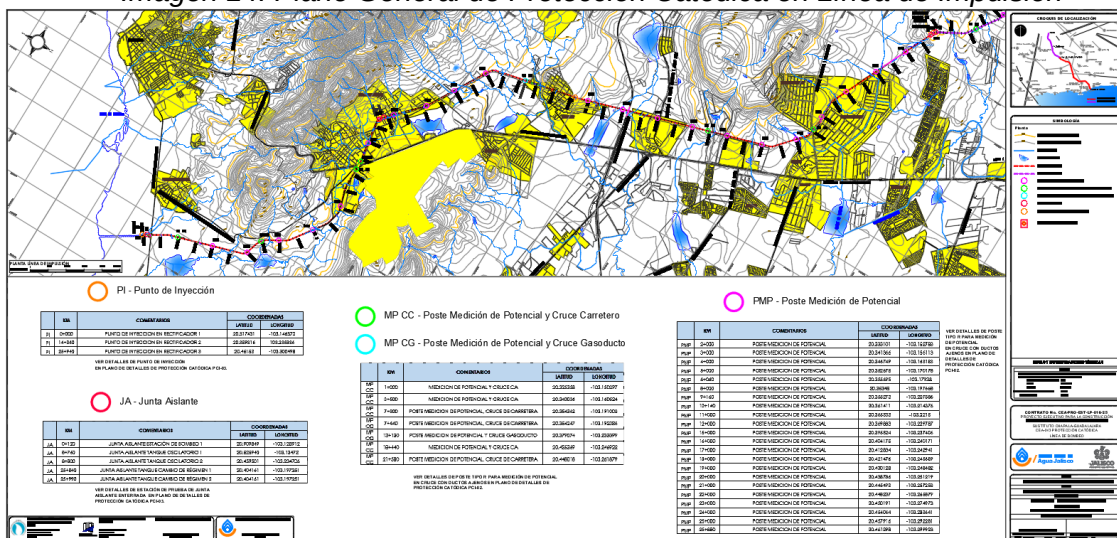
Se seleccionó el aislamiento en bridas para seccionar eléctricamente el ducto enterrado de las instalaciones superficiales, por su bajo costo de instalación y mantenimiento, tiempos de entregar reducidos.

Mantener un control de calidad del recubrimiento exterior e interior durante la etapa constructiva del Acueducto, aplicar recubrimiento en las uniones soldadas, realiza las pruebas con equipo Holiday detector en la totalidad de la línea antes del tapado y reparar las fallas de recubrimiento encontradas.

Si el acueducto atraviesa la pared de una fosa de válvulas o tanque, puede producirse contacto metálico entre la tubería y el refuerzo de acero del hormigón, lo que provoca una pérdida significativa de corriente de protección, se deben evitar en todo momento soldar o tener contacto metálico entre el ducto y el acero de refuerzo.

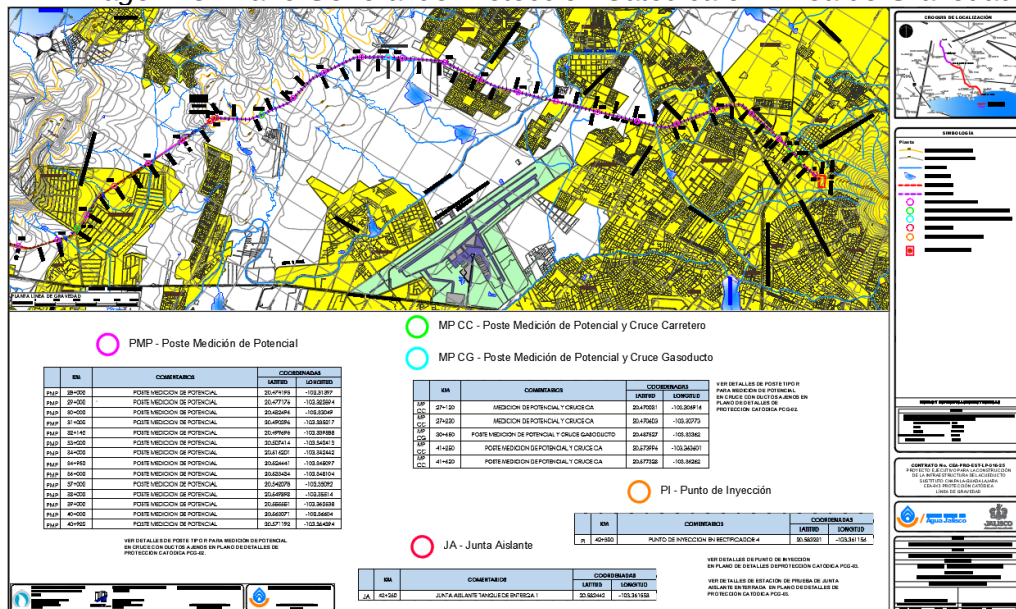
En la siguiente imagen se puede observar el plano de general de protección catódica en línea de impulsión, en este se observa la ubicación de los puntos de inyección, juntas aislantes, postes de medición potencial y postes de medición potencial en cruces carreteros y cruces de gasoducto.

**Imagen 14. Plano General de Protección Catódica en Línea de Impulsión**



En la siguiente imagen se puede observar el plano de general de protección catódica en línea de gravedad, en este se observa la ubicación de los puntos de inyección, juntas aislantes, postes de medición potencial y postes de medición potencial en cruces carreteros y cruces de gasoducto.

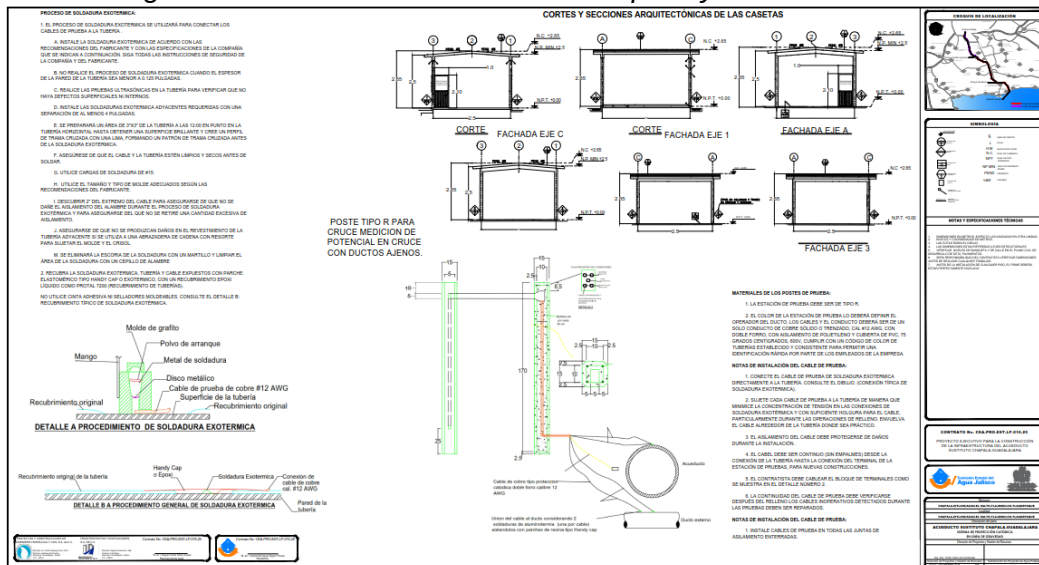
**Imagen 15. Plano General de Protección Catódica en Línea de Gravedad**



La imagen 16 muestra el plano de los detalles para el procedimiento de soldadura exotérmica y para el poste tipo R que se usa para cruces de medición potencial y cruces de medición potencial carreteros y de gasoducto.

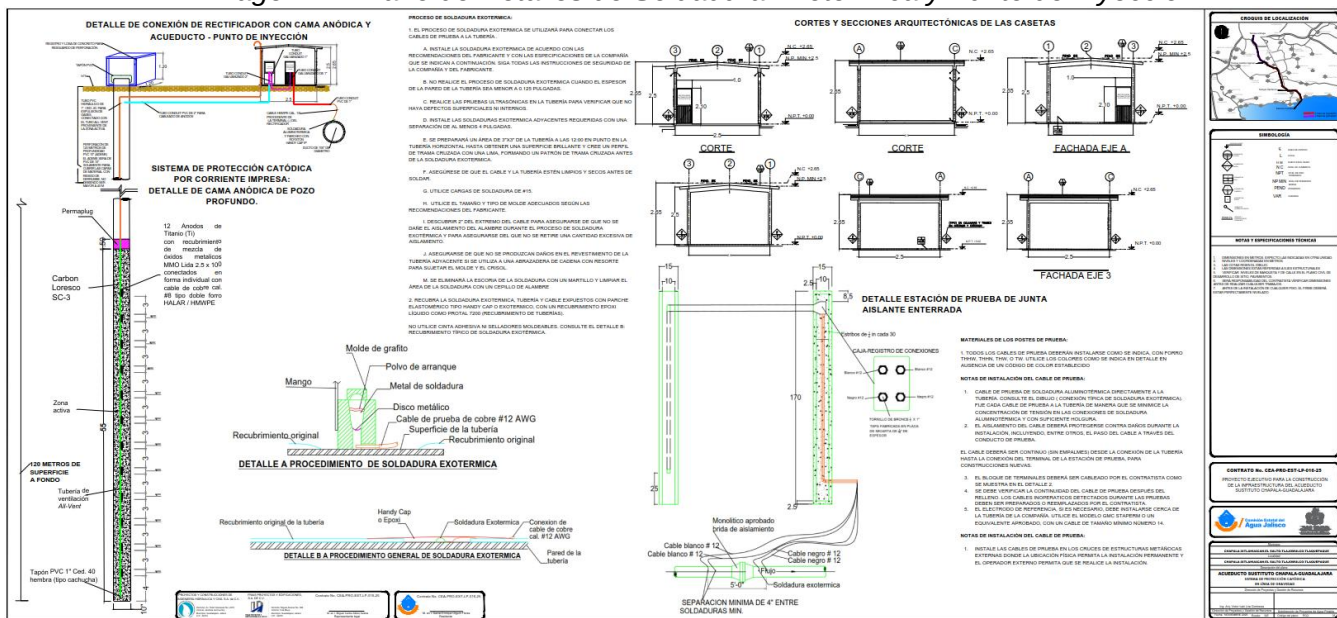


**Imagen 16. Plano de Detalles de Poste Tipo R y Soldadura Exotérmica**



La imagen 17 muestra el plano de los detalles para el procedimiento de soldadura exotérmica y para el sistema de protección catódica por corriente impresa, con el detalle de cama anódica profundo. Este detalle es el que se conoce como el Punto de Inyección.

**Imagen 17. Plano de Detalles de Soldadura Exotérmica y Punto de Inyección**





### 5.2.14 Telemetría

El objetivo de la Telemetría es diseñar e implementar un sistema integrado para medir, supervisar y (donde aplique) controlar variables hidráulicas y electromecánicas del acueducto, habilitando su operación centralizada mediante telemetría continua y registro histórico, con criterios de alta disponibilidad y escalabilidad.

#### Alcance de los Trabajos

- Medición en tiempo real de presión, caudal y nivel en 4 subestaciones telemétricas distribuidas a lo largo del acueducto.
- Adquisición local de señales y transmisión de datos mediante Unidades Terminales Remotas (UTR) S-32 (UTR-CR32).
- Control y supervisión de actuadores eléctricos de válvulas mariposa en la Subestación 3 (caja de control) y adquisición de parámetros eléctricos vía RS-485 Modbus.
- Interconexión mediante red de fibra óptica monomodo y equipo de conmutación Ethernet (IDF/MDF), contemplando redundancia y crecimiento futuro.
- Integración con sistema SCADA (existente o por instalar), alarmas, tendencias y almacenamiento histórico.
- Pruebas FAT/SAT, documentación de ingeniería, protocolos de puesta en marcha y lineamientos de operación/mantenimiento.

#### Parámetros de operación de referencia

- Caudal total de diseño: ~10,000 L/s (10 m<sup>3</sup>/s) con 5 bombas operativas en paralelo (orden de 1,800–2,000 L/s por bomba).
- Altura total de referencia: ~100–120 m (según condición de operación).
- Presión máxima esperada en operación estable: ≤ ~14 bar; se consideran márgenes para transitorios (golpe de ariete), por lo que se emplean rangos 0–16 bar y 0–30 bar para transmisores de presión.
- Tubería principal de gran diámetro (referencia DN 106"): velocidades típicas alrededor de 2.8 m/s para 10 m<sup>3</sup>/s (compatibles con medición ultrasónica clamp-on).

#### Elementos singulares relevantes para instrumentación

- Tanque de oscilación: amortigua transitorios y requiere monitoreo continuo de nivel.
- Tanque de cambio de régimen: punto de transición hidráulica con interés en niveles/seguridad operativa.
- Caja de control: punto de maniobra con válvulas mariposa de gran diámetro y actuadores eléctricos; requiere telemetría robusta y supervisión eléctrica.

#### Puntos de monitoreo y subestaciones telemétricas

Se establecen 4 subestaciones telemétricas distribuidas a lo largo del acueducto. Las primeras dos corresponden al tramo de impulsión, mientras que las dos últimas corresponden al tramo de gravedad.

En la tabla 5.44 se muestran las características de las mismas.

Tabla 5.46 Características de Puntos de Monitoreo

| Subestación | Progresiva | Elemento/Tramo                         | Instrumentación y telemetría                                                                                                                                                             |
|-------------|------------|----------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| S-1         | 8+780      | Tanque de Oscilación                   | LIT-01 (LH300), A02 (UTR S-32)                                                                                                                                                           |
| S-2         | 25+920     | Tanque de Cambio de Régimen            | LIT-02 y LIT-03 (LH300), A05 (UTR S-32)                                                                                                                                                  |
| S-3         | 30+900     | Caja de control / seccionamiento mayor | A06 (UTR S-32); actuadores AUMA eléctricos para válvulas mariposa Ø36", Ø42", Ø48" y Ø106" (MV-361-06, MV-421-06, MV-481-06, MV-1061-06); medidor de parámetros eléctricos RS-485 Modbus |
| S-4         | 42+420     | Tanque de Entrega en cerro             | LIT-03 y LIT-04 (LH300), A08 (UTR S-32)                                                                                                                                                  |

### Descripción de la solución propuesta (arquitectura)

#### Modelo por capas

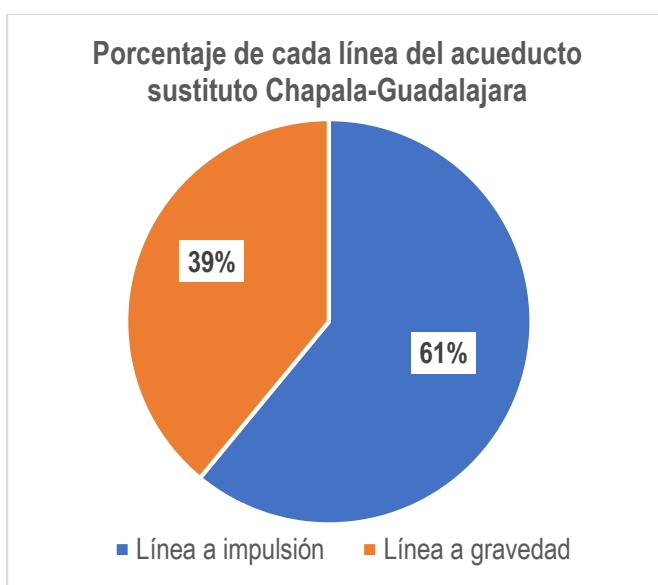
- Nivel de campo: instrumentos de proceso (presión, caudal, nivel), sensores de seguridad (puerta/movimiento) y actuadores eléctricos (Subestación 3).
- Nivel de adquisición local: UTR S-32 por subestación, con módulos de entradas/salidas analógicas y digitales, y comunicaciones Ethernet/Radio.
- Nivel de comunicaciones: red Ethernet industrial sobre fibra óptica monomodo, con terminación MDF en estación principal y IDF en cada subestación.
- Nivel de supervisión: SCADA en centro de control (operación, histórico, alarmas, reportes), con interfaces hacia operación local y corporativa.

## 6. Catálogo de conceptos, análisis de precios unitarios y presupuesto base

En el anexo se localizan los generadores, catálogo de conceptos, APU y presupuesto base.

El presente capítulo tiene como objetivo exponer y analizar la estructura de costos del proyecto de infraestructura urbana, a través del catálogo de conceptos, el análisis de precios unitarios y la integración del presupuesto base proyecto del acueducto sustituto Guadalajara – Chapala. Este análisis permite identificar la distribución de los recursos económicos, así como evaluar la proporción que representa cada etapa y cada partida de obra dentro del costo total del proyecto.

El proyecto se encuentra dividido en dos etapas constructivas. En este sentido, la figura 6.1 muestra el porcentaje de participación de la línea de conducción a impulsión y de la línea a gravedad con respecto al monto total de la obra. Esta comparación permite visualizar de manera clara la magnitud relativa de cada etapa, evidenciando que la línea a impulsión posee un mayor peso financiero dentro del presupuesto global del proyecto.



*Figura 6.1 Porcentaje de participación de la línea de impulsión y de gravedad.*

Asimismo, con el propósito de profundizar en la composición del presupuesto, se presenta la figura 6.2, la cual ilustra el porcentaje que representa cada partida de conceptos correspondiente a la línea de bombeo. Dicho gráfico permite identificar los conceptos con mayor incidencia económica en esta fase del proyecto, reflejando las actividades que concentran la mayor inversión y que, por tanto, resultan críticas para el control de costos y el seguimiento financiero.

De manera complementaria, el Gráfico 3 muestra la distribución porcentual de las partidas de conceptos que integran la Etapa 2. Este análisis facilita la comparación entre etapas, permitiendo reconocer similitudes o variaciones en la estructura de costos, así como los conceptos que adquieren mayor relevancia en esta fase del desarrollo del proyecto.



Figura 6.2 Porcentaje de cada partida en la línea a bombeo.

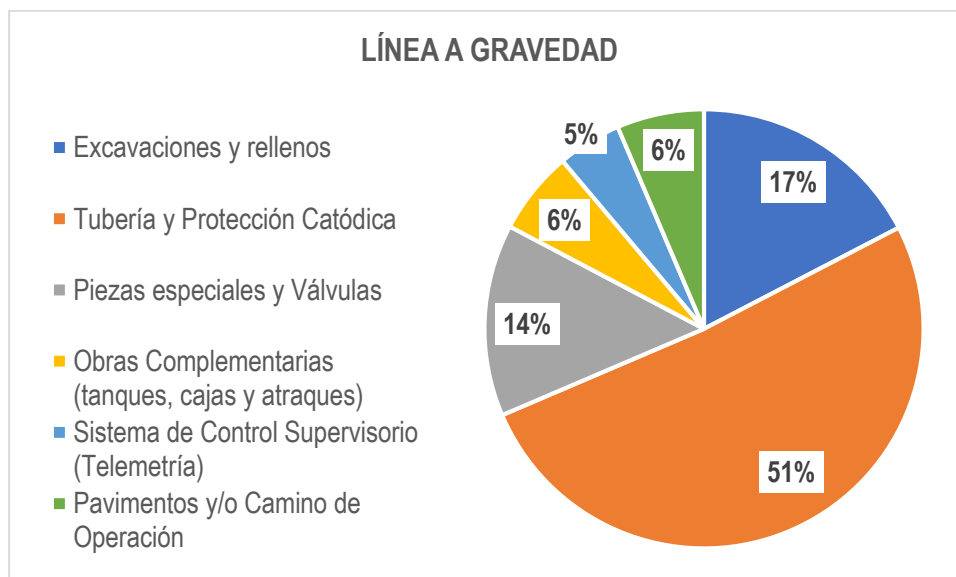


Figura 6.3 Porcentaje de cada partida en la línea a gravedad.

## **7. Especificaciones de obra**

En el anexo se localizan las especificaciones técnicas y constructivas.

## **8. Calendario de ejecución y programación**

En el anexo se localiza el calendario de ejecución.

## **9. Manuales de operación y mantenimiento**

En el anexo se localiza el manual de operación y mantenimiento.