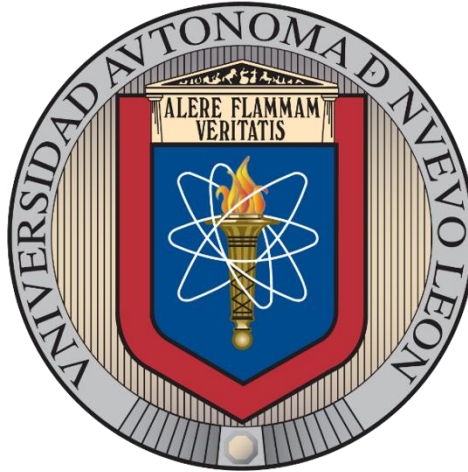


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



**EVALUACIÓN DE LAS FILTRACIONES DE LA PRESA EL CUCHILLO Y SU
IMPACTO AMBIENTAL EN EL SUMINISTRO DE AGUA POTABLE PARA
MONTERREY Y SU ESTABILIDAD DE LA CORTINA Y EL DIQUE**

POR:

GABRIEL MORALES VILLALBA

**COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN
CIENCIAS CON ORIENTACIÓN EN INGENIERÍA AMBIENTAL**

SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, N.L.

SEPTIEMBRE 2026



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



**EVALUACIÓN DE LAS FILTRACIONES DE LA PRESA EL CUCHILLO Y SU
IMPACTO AMBIENTAL EN EL SUMINISTRO DE AGUA POTABLE PARA
MONTERREY Y SU ESTABILIDAD DE LA CORTINA Y EL DIQUE**

**COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN
CIENCIAS CON ORIENTACIÓN EN INGENIERÍA AMBIENTAL**

POR:
GABRIEL MORALES VILLALBA

Vo. Bo.

Dr. Héctor De León Gómez
Director de Tesis



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



**EVALUACIÓN DE LAS FILTRACIONES DE LA PRESA EL CUCHILLO Y SU
IMPACTO AMBIENTAL EN EL SUMINISTRO DE AGUA POTABLE PARA
MONTERREY Y SU ESTABILIDAD DE LA CORTINA Y EL DIQUE**

**COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN
CIENCIAS CON ORIENTACIÓN EN INGENIERÍA AMBIENTAL**

POR:

GABRIEL MORALES VILLALBA

Vo. Bo.

Comité de Revisión de Tesis

Dr. Héctor De León Gómez
Director de Tesis

Dra. Fabiola Doracely Yépez
Codirectora de Tesis

Dr. Ricardo Alberto Cavazos González
Asesor Interno



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

2026/10/01

DR. JOSÉ MANUEL MENDOZA RANGEL
SUBDIRECTOR DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
PRESENTE.-

Estimado Dr. Mendoza Rangel,

Por medio de la presente, hago de su conocimiento que he finalizado la revisión del documento de TESIS, cuyo título es **“EVALUACIÓN DE LAS FILTRACIONES DE LA PRESA EL CUCHILLO Y SU IMPACTO AMBIENTAL EN EL SUMINISTRO DE AGUA POTABLE PARA MONTERREY Y SU ESTABILIDAD DE LA CORTINA Y EL DIQUE”**, que presenta el ING. GABRIEL MORALES VILLALBA, como requisito parcial para obtener el grado de MAESTRO EN CIENCIAS, del programa MAESTRÍA EN CIENCIAS CON ORIENTACIÓN EN INGENIERÍA AMBIENTAL.

Por lo anterior, me permito informar a Usted que el documento CUENTA con la calidad y nivel CIENTÍFICO, adecuados para su defensa, por lo que dictamino que este trabajo sea APROBADO.

Asimismo, anexo a este documento el formato de evaluación correspondiente, donde hago saber mis comentarios y observaciones al respecto.

Sin otro particular por el momento, me despido y quedo a sus órdenes para cualquier duda o aclaración que considere pertinente.

Atentamente,

DR. HÉCTOR DE LEÓN GÓMEZ

Evaluator



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

Av. Pedro de Alba S/N Ciudad Universitaria, San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México, C.P. 66455
81 8329 4000 ext. 4060 • www.fic.uanl.mx



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

FECHA: 2026/OCTUBRE/20

DR. JOSÉ MANUEL MENDOZA RANGEL
SUBDIRECTOR DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
PRESENTE.-

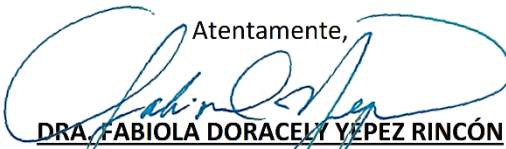
Estimado Dr. Mendoza Rangel,

Por medio de la presente, hago de su conocimiento que he finalizado la revisión del documento de **TESIS**, cuyo título es **“EVALUACIÓN DE LAS FILTRACIONES DE LA PRESA EL CUCHILLO Y SU IMPACTO AMBIENTAL EN EL SUMINISTRO DE AGUA POTABLE PARA MONTERREY Y SU ESTABILIDAD DE LA CORTINA Y EL DIQUE”**, que presenta el **ING. GABRIEL MORALES VILLALBA**, como requisito parcial para obtener el grado de **MAESTRO EN CIENCIAS**, del programa **MAESTRÍA EN CIENCIAS CON ORIENTACIÓN EN INGENIERÍA AMBIENTAL**.

Por lo anterior, me permito informar a Usted que el documento **CUENTA** con la calidad y nivel **CIENTÍFICO**, adecuados para su defensa, por lo que dictamino que este trabajo sea **APROBADO**.

Asimismo, anexo a este documento el formato de evaluación correspondiente, donde hago saber mis comentarios y observaciones al respecto.

Sin otro particular por el momento, me despido y quedo a sus órdenes para cualquier duda o aclaración que considere pertinente.

Atentamente,

DRA. FABIOLA DORACELY YÉPEZ RINCÓN
Evaluadora


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

Av. Pedro de Alba S/N Ciudad Universitaria, San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México, C.P. 66455

81 8329 4000 ext. 4060 • www.fic.uanl.mx



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
FECHA: 2026/09/29

DR. JOSÉ MANUEL MENDOZA RANGEL
SUBDIRECTOR DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
PRESENTE. -

Estimado Dr. Mendoza Rangel,

Por medio de la presente, hago de su conocimiento que he finalizado la revisión del documento de **TESIS**, cuyo título es **"EVALUACIÓN DE LAS FILTRACIONES DE LA PRESA EL CUCHILLO Y SU IMPACTO AMBIENTAL EN EL SUMINISTRO DE AGUA POTABLE PARA MONTERREY Y SU ESTABILIDAD DE LA CORTINA Y EL DIQUE"**, que presenta el **GABRIEL MORALES VILLALBA**, como requisito parcial para obtener el grado de **MAESTRO EN CIENCIAS**, del programa **MAESTRÍA EN CIENCIAS CON ORIENTACIÓN EN INGENIERÍA AMBIENTAL**.

Por lo anterior, me permito informar a Usted que el documento **CUENTA** con la calidad y nivel **CIENTÍFICO**, adecuados para su defensa, por lo que dictamino que este trabajo sea **APROBADO**.

Asimismo, anexo a este documento el formato de evaluación correspondiente, donde hago saber mis comentarios y observaciones al respecto.

Sin otro particular por el momento, me despido y quedo a sus órdenes para cualquier duda o aclaración que considere pertinente.

Atentamente,


DR. RICARDO ALBERTO CAVAZOS GONZÁLEZ





FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

Comprobante de corrección de escritos

ESTUDIANTE ☒ PROFESOR ☐

NOMBRE: GABRIEL MORALES VILLALBA

TIPO DE DOCUMENTO: ARTÍCULO ☐ TESIS ☒ PI ☐ OTRO ☐

TÍTULO DEL DOCUMENTO A REVISAR:

EVALUACIÓN DE LAS FILTRACIONES DE LA
PRESA EL CUCHILLO Y SU IMPACTO AMBIENTAL
EN EL SUMINISTRO DE AGUA POTABLE PARA
MONTERREY Y SU ESTABILIDAD DE LA CORTINA Y
EL DIQUE.

RECOMENDACIONES ADICIONALES:

REALIZAR LAS CORRECCIONES QUE APAREZCAN
EN LA TESIS IMPRESA

*Este documento certifica la corrección DEFINITIVA del trabajo arriba identificado, en los aspectos: ortográfico, metodológico y estilístico.

Nombre y firma de quien corrigió:

Camargo

Arq. Ramón Longoria Ramírez
Asesor Profesional de Apoyo

[Firma]
Dr. José Manuel Mendoza Rangel
Subdirector de Estudios de Posgrado e Investigación

Ciudad Universitaria, 30 de 09 de 2016

SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

Av. Pedro de Alba S/N Ciudad Universitaria, San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México, C.P. 66455

81 8329 4000 ext. 4060 • www.fic.uanl.mx

Universidad Autónoma de Nuevo León
Facultad de Ingeniería Civil
Subdirección de Estudios de Posgrado e Investigación.

Los miembros del comité evaluador recomendamos que la Tesis titulada “**Evaluación de las filtraciones de la Presa El Cuchillo y su impacto ambiental en el suministro de agua potable para Monterrey y su estabilidad de la cortina y el dique**”, realizada por el **Ing. Gabriel Morales Villalba**, con número de matrícula **2081535**, sea aceptada para su defensa como requisito parcial para obtener el grado de **Maestro en Ciencias** dentro del programa **Maestría en Ciencias con Orientación en Ingeniería Ambiental**.

El Comité Evaluador:

Dr. Héctor de León Gómez
Director de tesis

Dra. Fabiola Doracely Yepez Rincón
Codirectora de la tesis

Dr. Ricardo Alberto Cavazos González
Asesor interno de la tesis

Dr. José Manuel Mendoza Rangel
Subdirector de Estudios de Posgrado e Investigación

San Nicolás de los Garza, Nuevo León.

Octubre, 2026.

DEDICATORIA

A mi familia, a mi novia y a mis amigos, quienes estuvieron presentes durante este proceso y fueron parte fundamental de este camino. Gracias por su apoyo y cariño a lo largo de las distintas etapas que me llevaron hasta aquí. Ustedes saben quiénes son y todo lo que me han aportado.

Y, en especial, a mí mismo; por no rendirme cuando el camino parecía difícil, por seguir adelante aun cuando alguna vez dudé de hasta dónde podía llegar, y por tener el valor de perseguir aquello que alguna vez parecía lejano o incluso imposible.

A ese niño que un día soñó con alcanzar metas que parecían estar fuera de su alcance, le dedico este logro. Hoy puedo decirle que aquí está la prueba de que, *cuando te propones algo, puedes lograrlo.*

AGRADECIMIENTOS

Agradezco profundamente al Dr. Héctor De León, director de esta tesis, por su orientación, asesoría y conocimientos compartidos a lo largo de este proceso. Especialmente su paciencia, las revisiones y aportaciones que contribuyeron al desarrollo de este trabajo, así como la confianza depositada en mí. Le agradezco también su apoyo y motivación para culminar esta investigación y mis estudios de maestría, así como la oportunidad de aprender de su experiencia y solidez académica. Finalmente, agradezco su amistad y la cercanía que mostró durante esta etapa, cualidades que hicieron de su acompañamiento una parte valiosa de mi formación.

Al Dra. Fabiola Doracely Yépez Rincón, codirectora de tesis, y al Dr. Ricardo Alberto Cavazos González, asesor interno, por su apoyo, disposición y asesoría durante el desarrollo de esta investigación, así como por sus aportaciones que contribuyeron a fortalecer el trabajo realizado.

Al Dr. Arquímedes Cruz López, al Dr. Daniel Sánchez Martínez y al Dr. Antonio Cardona Benavides, integrantes del comité evaluador interno, por el tiempo dedicado a la revisión semestral de mis avances, así como por sus comentarios, observaciones y recomendaciones, que contribuyeron a mejorar y fortalecer la estructura de esta tesis. De manera especial, agradezco al Dr. Arquímedes Cruz López, quien además de formar parte de mi comité, fue mi tutor durante estos dos años de maestría. Le agradezco profundamente su guía, acompañamiento y tutoría a lo largo de este proceso, así como la amistad que me brindó durante esta etapa.

A la Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL) y a la Facultad de Ingeniería Civil (FIC), por brindarme la oportunidad de continuar con mi formación académica, así como por las herramientas, espacios y oportunidades que hicieron posible el desarrollo de esta etapa de mi formación profesional.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por el apoyo económico brindado durante el desarrollo de mis estudios de maestría y de esta investigación.

A mi familia, por motivarme a seguir adelante y, en especial, a mis hermanas Clara y Fátima, por brindarme siempre su apoyo y aliento, escucharme en los momentos en que las inquietudes me abrumaban y ayudarme a encontrar la fortaleza necesaria para superar las dificultades.

A mis sobrinos Jessica y Josué, a quienes siempre he procurado apoyar y motivar para que persigan sus sueños y alcancen sus metas. Que nunca duden de sus capacidades ni de todo lo que pueden lograr cuando se esfuerzan por aquello que desean.

A mi novia Aylin, por acompañarme y estar presente a lo largo de este proceso, especialmente durante la etapa final de esta investigación. Gracias por escucharme y brindarme tu cariño, aliento y la fuerza necesaria para seguir adelante en los momentos difíciles, cuando el cansancio o las dudas amenazaban con hacerme desistir. Asimismo, agradezco profundamente a sus padres por su apoyo, cariño y confianza, así como por sus atenciones y por acompañarme durante esta etapa tan importante de mi vida.

A mis compañeros y grandes amigos, con quienes tuve la dicha de coincidir durante esta maravillosa etapa, por su amistad y por todos los momentos que compartimos. Gracias por las aventuras, las risas y las experiencias que hicieron de los cubículos del Instituto de Ingeniería Civil y de tantos lugares de Monterrey escenarios de recuerdos que siempre llevaré conmigo. Me alegra haber coincidido con cada uno de ustedes y haber compartido esta etapa a su lado. Son grandes personas que conservaré siempre en mi memoria y en mi corazón: Ilse, Paola, Mariana, Lourdes, Dariela, Fernanda, Deyna, Carlos, Javier, Sebastián, Edwin, Roberto, Damián y Oscar.

A mis roomies y grandes amigos Kasandra, Reynaldo, Julia, Ferreira y Gabriela, por el tiempo y las experiencias compartidas, por las risas y los buenos momentos, y por convertirse en mucho más que compañeros de vivienda: una familia con la que pude compartir mis inquietudes, sentirme escuchado y encontrar apoyo en todo momento. Gracias por hacer de esa etapa una experiencia más cálida y especial, y por todos los recuerdos que construimos juntos.

ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE FIGURAS	XV
ÍNDICE DE TABLAS.....	XXI
RESUMEN	XXIV
ABSTRACT.....	XXV
CAPÍTULO 1. GENERALIDADES	1
1.1 Introducción	1
1.1.1 Las presas como obras de infraestructura	1
1.1.2 La presa “El Cuchillo”	2
1.2 Antecedentes.....	4
1.2.1 Estudios e investigaciones en presas de tierra	4
1.2.2 Estudios e investigaciones en la presa El Cuchillo	8
1.3 Justificación	13
1.4 Hipótesis	14
1.5 Objetivos.....	14
1.5.1 Objetivo general.....	14
1.5.2 Objetivos específicos	15
CAPÍTULO 2. CARACTERÍSTICAS DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	16
2.1 Área de estudio	16
2.2 Clima	17
2.3 Fisiografía	19
2.3.1 Provincia Fisiográfica: Grandes Llanuras de Norteamérica	19
2.3.2 Subprovincia Fisiográfica: Llanuras de Coahuila y Nuevo León	20
2.4 Geología.....	25
2.4.1 Geología regional	25
2.4.2 Geología local	27
2.5 Hidrología	32
2.5.1 Región Hidrológica 24 Bravo-Conchos.....	33
2.5.2 Subregión Hidrológica Bajo Bravo	34
2.5.3 Cuenca Hidrológica “Río San Juan 1”	35
2.6 Hidrogeología	37
2.6.1 Acuífero China-General Bravo (Regional).....	37
2.6.2 Acuífero de la Loma Los Pozos (Local)	40
CAPÍTULO 3. MARCO TEÓRICO	43

3.1 Teledetección y análisis espacial	43
3.1.1 Fundamentos de la fotointerpretación	43
3.1.2 Principios de la teledetección	46
3.1.3 Aplicaciones en estudios geológicos, hidrológicos e hidrogeológicos	49
3.1.4 Sistemas de Información Geográfica (SIG)	49
3.1.5 Uso de Google Earth Pro en el análisis espacial	51
3.1.6 Limitaciones y validación del análisis espacial	52
3.2 Hidrogeología	53
3.2.1 Clasificación de las unidades hidrogeológicas	53
3.2.2 Tipos de acuífero	54
3.2.3 Piezometría	57
3.2.4 Tipos de superficies piezométricas	62
3.2.5 Interpretación cualitativa de superficies piezométricas	63
3.3 Hidrología	67
3.3.1 Balance hídrico en embalses	68
3.3.2 Componentes del balance hídrico	70
3.3.3 Precipitación	71
3.3.4 Esguerrimiento superficial	72
3.3.5 Evaporación en embalses	73
3.3.6 Extracciones y transferencias de agua en embalses	74
3.3.7 Filtraciones en presas	75
3.3.8 Almacenamiento en embalses	76
3.4 Hidráulica de canales abiertos	77
3.4.1 Aforo de corrientes	78
3.4.2 Método sección-velocidad	78
3.4.3 Distribución de velocidades en una sección transversal	80
CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA	83
4.1 Estudio bibliográfico	83
4.2 Documentación de las Filtraciones	84
4.2.1 Identificación y caracterización de las zonas afectadas	84
4.2.2 Mapeo de las zonas afectadas	88
4.2.3 Análisis multitemporal y delimitación espacial de las áreas afectadas	90
4.2.4 Elaboración de cartas de filtraciones	93
4.3 Análisis hidrogeológico del régimen de flujo subterráneo	94
4.3.1 Compilación y análisis de información hidrogeológica	94

4.3.2 Identificación y selección de puntos piezométricos	95
4.3.3 Estimación de datos faltantes.....	105
4.3.4 Elaboración de cartas piezométricas	115
4.4 Balance hídrico del embalse de la Presa El Cuchillo.....	118
4.4.1 Planteamiento general del balance hídrico.....	118
4.4.2 Recopilación de información	120
4.4.3 Procesamiento de información y estimación de áreas del embalse	125
4.4.4 Integración y comparación del balance hídrico	140
4.4.5 Alcances y consideraciones del balance hídrico	144
4.5 Estimación del gasto del río San Juan.....	145
4.5.1 Levantamiento y medición de velocidades	145
4.5.2 Determinación del área hidráulica y cálculo del gasto	149
4.5.3 Balance hídrico diario del embalse	154
4.5.4 Comparación de los gastos estimados.....	159
CAPÍTULO 5. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	161
5.1 Distribución espacial y evolución de las filtraciones	161
5.2 Comportamiento piezométrico y régimen del flujo subterráneo	166
5.3 Relación entre el flujo subterráneo y las zonas de filtración	171
5.4 Magnitud y comportamiento de las pérdidas por filtración	176
5.5 Análisis comparativo de las estimaciones de gasto.....	183
5.6 Impacto e implicaciones de las filtraciones.....	187
5.7 Integración y discusión general de resultados	192
CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	194
6.1 Conclusiones.....	194
6.2 Recomendaciones	196
BIBLIOGRAFÍA	199
ANEXOS	204
Anexo I: Mapa del Área de Estudio	205
Anexo II: Cartas de Filtraciones.....	207
Anexo III: Cartas Piezométricas.....	216
Anexo IV: Cartas de Filtraciones-Piezometría	221

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Localización del área de estudio y Presa El Cuchillo (elaboración propia a partir de imágenes satelitales de Google Earth Pro, 2022). -----	16
Figura 2. Tipos de clima en el municipio de China, N.L. (modificado de INEGI, 2010). -- -----	18
Figura 3. Región fisiográfica de Nuevo León (INEGI, 1986). -----	19
Figura 4. Provincia fisiográfica Grandes Llanuras de Norteamérica (elaboración propia a partir de mapa interactivo de INEGI, 2022). -----	20
Figura 5. Subprovincia fisiográfica Llanuras de Coahuila y Nuevo León (elaboración propia a partir de mapa interactivo de INEGI, 2022). -----	21
Figura 6. Cuenca de Burgos y altos estructurales que la rodean: (a) Sierra Burro-Picachos, (b) Sierra de San Carlos, (c) Anticlinal Huizachal-Peregrina, (d) Sierra Madre Oriental (modificado de Hernández, 2019). -----	25
Figura 7. Franjas geológicas de la Cuenca de Burgos (Hernández, 2019). -----	26
Figura 8. Secuencia de areniscas y lutitas arenosas de la Formación Mount Selman, en un corte sobre la autopista Monterrey-Reynosa, al NE de la presa El Cuchillo (elaboración propia, 2021). -----	27
Figura 9. Fracturamiento por intemperismo en estrato de arenisca, afloramiento situado aguas abajo de la cortina de la presa El Cuchillo, China, N.L. (elaboración propia, 2021). -----	28
Figura 10. Sección litológica de la Loma Los Pozos (Navarro, 1996). -----	29
Figura 11. Perfil geológico B-B', Loma Los Pozos (Navarro, 1996). -----	30
Figura 12. Principales elementos estructurales de la Loma Los Pozos y su relación con el eje de la cortina. Los valores de dirección se expresan en azimuth (Navarro, 1996). -- -----	31
Figura 13. Subregiones hidrológicas de la RH 24 Bravo-Conchos (CONAGUA, 2023). - -----	33
Figura 14. Subregión Hidrológica Bajo Bravo (CONAGUA, 2023). -----	34
Figura 15. Cuenca hidrológica Río San Juan 1 (elaboración propia a partir de mapa de CONAGUA, 2023). -----	35
Figura 16. Localización del acuífero China-General Bravo (1913) (modificado de CONAGUA, 2024). -----	37

Figura 17. Sección geológica esquemática (obtenida de Carta Geológico-Minera “Río Bravo G14-8”, Esc. 1:250,000, SGM-INEGI, 2008). -----	38
Figura 18. Disponibilidad Media Anual de Agua del Subsuelo en un Acuífero (CONAGUA, 2015). -----	39
Figura 19. Unidades hidrogeológicas, Loma Los Pozos, China, Nuevo León (Navarro, 1996). -----	40
Figura 20. Afloramiento donde se distingue la posición ligeramente inclinada de la secuencia alternante de rocas que conforman la unidad geológica del área de estudio, zona aguas abajo de la cortina (elaboración propia, 2021). -----	41
Figura 21. Áreas de reflexión especular asociadas a cuerpos de agua en fotografía aérea. Lago Green, condado de Green Lake, Wisconsin, EE. UU. (Lillesand et al., 2015). -----	44
Figura 22. Principales formas de teledetección según la fuente de energía y el tipo de interacción radiación–superficie: (I) reflexión; (II) emisión; (III) reflexión–emisión (Chuvieco, 2010). -----	46
Figura 23. Elementos principales de un Sistema de Información Geográfica (Longley et al., 2015). -----	50
Figura 24. Interfaz general del software Google Earth Pro (elaboración propia, 2022). - -----	51
Figura 25. (a) Acuífero de poros, (b) acuífero de grietas, (c) acuífero kárstico (Werner, 1996). -----	55
Figura 26. Representación de un acuífero libre (a), y de un acuífero confinado (b), donde se presentan dos condiciones: un pozo en el que el nivel piezométrico se eleva sin alcanzar la superficie, y otro en el que dicho nivel supera el terreno, generando condiciones artesianas (modificado de Werner, 1996). -----	56
Figura 27. Representación de un acuífero semiconfinado con dos condiciones de flujo. Caso 1: cuando el nivel piezométrico del acuífero libre A es mayor que el del acuífero semiconfinado B, se presenta un flujo descendente (rezume) desde el acuífero superior hacia el inferior a través de la capa semipermeable. Caso 2: cuando el nivel piezométrico del acuífero libre A es menor que el del acuífero semiconfinado B, se presenta un flujo ascendente (rezume) desde el acuífero inferior hacia el superior a través de la capa semipermeable (modificado de Werner, 1996). -----	56
Figura 28. Representación de un acuífero de estratos múltiples, compuesto por un acuífero colgado (A), un acuífero libre (B) y acuíferos confinados (C y D), separados por capas de baja permeabilidad. El esquema muestra procesos de recarga, flujo	

subterráneo y descarga, así como la existencia de distintos niveles piezométricos asociados a cada unidad hidrogeológica (modificado de Werner, 1996). -----	57
Figura 29. Medición del nivel piezométrico en un pozo de observación (modificado de Werner, 1996). -----	59
Figura 30. Triangulo hidrológico (modificado de Werner, 1996). -----	60
Figura 31. Parte de un plano piezométrico, construido a partir de varios triángulos hidrológicos, en donde las líneas de flujo tienen que ser perpendiculares a las isopiezas (modificado de Werner, 1996). -----	61
Figura 32. Fórmula para obtener el gradiente piezométrico (i) (modificado de Werner, 1996). -----	61
Figura 33. Ejemplos representativos de superficies piezométricas y sus patrones de flujo, con diversas combinaciones bajo distintas condiciones hidráulicas (modificado de Custodio & Llamas, 1983). -----	63
Figura 34. Configuración de isopiezas y líneas de flujo que muestran casos de convergencia hacia zonas de descarga y divergencia desde zonas de recarga (modificado de Custodio & Llamas, 1983). -----	64
Figura 35. Efectos de variaciones en el espesor y la permeabilidad del acuífero sobre la separación de las isopiezas en un sistema de líneas de flujo paralelas (modificado de Custodio & Llamas, 1983). -----	65
Figura 36. Distorsión de las curvas piezométricas en acuíferos con flujo natural, generada por el bombeo en pozos (modificado de Custodio & Llamas, 1983). -----	65
Figura 37. Representación de divisorias y vaguadas piezométricas en acuíferos confinados y semiconfinados (modificado de Custodio & Llamas, 1983). -----	66
Figura 38. Efecto de fallas de baja permeabilidad sobre la configuración de las curvas piezométricas y el flujo subterráneo (modificado de Custodio & Llamas, 1983). -----	67
Figura 39. Representación general del ciclo hidrológico y sus principales procesos (Chow et al., 1994). -----	68
Figura 40. Representación de una dovela en la sección transversal de un río para la determinación del gasto (modificado de Aparicio, 1992). -----	79
Figura 41. Distribución de velocidades en una sección transversal y perfil vertical de velocidad en una corriente (modificado de IMTA, 1992). -----	81
Figura 42. Viviendas en la localidad de China, N.L. que presentan problemas de humedad y ensalitramiento (elaboración propia, 2021). -----	84

Figura 43. Zona con saturación hídrica, donde se observa el espejo de agua, localizada en un terreno de la localidad de China, aguas abajo de la cortina (elaboración propia, 2021). -----	85
Figura 44. Zona con saturación hídrica, donde se observa el espejo de agua, ubicada junto a la autopista Monterrey-Reynosa, aguas abajo del dique (elaboración propia, 2021). -----	85
Figura 45. Presencia de tule en una extensa área, indicativa de suelos saturados o anegados, ubicada en las afueras de la localidad de China, N.L. (elaboración propia, 2021). -----	86
Figura 46. Presencia extensiva de tule en un terreno privado, con alta densidad que puede interferir con actividades humanas y uso de suelo, localizado aguas abajo de la cortina (elaboración propia, 2021). -----	86
Figura 47. Humedal (lado izquierdo de la imagen) donde se observa el espejo de agua y la presencia de tule, ubicado dentro de la localidad de China, Nuevo León (elaboración propia, 2021). -----	87
Figura 48. Humedal donde se observa el espejo de una extensa acumulación de agua y la presencia de tule en gran parte del terreno, localizado agua abajo del dique (elaboración propia, 2021). -----	87
Figura 49. Ubicación de las zonas afectadas, identificadas mediante visitas de campo y análisis remoto (elaboración propia a partir de imagen satelital de Microsoft Bing Maps, 2021). -----	88
Figura 50. Localización de zonas con saturación hídrica (ZH) y zonas de humedales (ZI), en zona aguas abajo de la cortina (elaboración propia a partir de imagen satelital de Google Earth Pro, 2021). -----	89
Figura 51. Localización de zonas con saturación hídrica (ZH) y zonas de humedales (ZI), en zona aguas abajo del dique (elaboración propia a partir de imagen satelital de Google Earth Pro, 2021). -----	90
Figura 52. Delimitación espacial de las áreas afectadas, en zona aguas debajo de la cortina (elaboración propia a partir de imagen satelital de Google Earth Pro, 2021). -	92
Figura 53. Delimitación espacial de las áreas afectadas, en zona aguas abajo del dique (elaboración propia a partir de imagen satelital de Google Earth Pro, 2021). -----	92
Figura 54. Identificación y medición del Pozo 1 (PZ-1) (elaboración propia, 2021). ---	96
Figura 55. Identificación de la Noria 1 (NR-1) (elaboración propia, 2021). -----	97

Figura 56. Localización de aprovechamientos hidráulicos identificados en campo (elaboración propia a partir de imagen satelital de Google Earth Pro, 2021). -----	98
Figura 57. Visor interactivo del Sistema Nacional de Información del Agua (SINA) (elaboración propia a partir del visor interactivo de CONAGUA, 2021). -----	99
Figura 58. Visor interactivo del Sistema de Información Geográfica de Aguas Subterráneas (SIGAGIS) (elaboración propia a partir del visor interactivo de CONAGUA, 2021). -----	99
Figura 59. Búsqueda de puntos de medición piezométrica complementarios en acuíferos colindantes al sur y sureste del área de estudio (elaboración propia a partir del visor interactivo de CONAGUA, 2021). -----	102
Figura 60. Localización de los pozos piezométricos seleccionados para la elaboración de las cartas piezométricas (elaboración propia a partir de imagen satelital de Google Earth Pro, 2021). -----	103
Figura 61. Selección de los pozos de influencia mediante triangulación para los pozos a estimar CG-22 y CG-31 (elaboración propia a partir de imagen satelital de Google Earth Pro, 2021). -----	107
Figura 62. Informe técnico donde se muestran los valores estadísticos mensuales de filtración reportados de la Presa El Cuchillo para los años del 2018 al 2022 (CONAGUA, 2022). -----	124
Figura 63. Determinación de los parámetros de ajuste por mínimos cuadrados (elaboración propia, 2022). -----	129
Figura 64. Relación entre el almacenamiento y el área superficial del embalse de la Presa El Cuchillo y representación del ajuste lineal seleccionado (elaboración propia, 2022). -----	130
Figura 65. Elevaciones, almacenamientos y porcentajes de llenado promedios del embalse de la Presa El Cuchillo durante 2021 (elaboración propia, 2022). -----	132
Figura 66. Ubicación del sitio de levantamiento sobre el río San Juan, aguas abajo de la cortina (elaboración propia a partir de imagen satelital de Google Earth Pro, 2026). - -----	145
Figura 67. Sección transversal del río San Juan obtenida a partir del levantamiento de campo (elaboración propia, 2022). -----	147
Figura 68. Medidor electromagnético de velocidad HACH-FH950 (elaboración propia, 2021). -----	148

Figura 69. Ubicación de las mediciones puntuales de velocidad realizadas en la vertical P-6 de la sección transversal del río San Juan (elaboración propia, 2022). -----	148
Figura 70. División de la sección transversal del río San Juan en dovelas (elaboración propia, 2022). -----	149
Figura 71. Perfil vertical de velocidades de referencia (elaboración propia, 2022). ---	150
Figura 72. Distribución espacial de las áreas con saturación hídrica para los años 2009, 2019 y 2021: aguas abajo de la cortina (elaboración propia a partir de imagen satelital de Google Earth Pro, 2021). -----	162
Figura 73. Distribución espacial de las áreas con saturación hídrica para los años 2009, 2019 y 2021: aguas abajo del dique (elaboración propia a partir de imagen satelital de Google Earth Pro, 2021). -----	162
Figura 74. Relación entre el almacenamiento, el área del embalse y las áreas con saturación hídrica (elaboración propia, 2022). -----	164
Figura 75. Configuración piezométrica y direcciones de flujo subterráneo en el entorno de la presa El Cuchillo para el año 2005 (elaboración propia, 2021). -----	168
Figura 76. Configuración piezométrica y direcciones de flujo subterráneo en el entorno de la presa El Cuchillo para el año 2006 (elaboración propia, 2021). -----	168
Figura 77. Configuración piezométrica y direcciones de flujo subterráneo en el entorno de la presa El Cuchillo para el año 2007 (elaboración propia, 2021). -----	169
Figura 78. Configuración piezométrica y direcciones de flujo subterráneo en el entorno de la presa El Cuchillo para el año 2009 (elaboración propia, 2021). -----	169
Figura 79. Relación entre la piezometría y las zonas con saturación hídrica aguas abajo de la cortina para 2009 (elaboración propia a partir de imagen satelital de Google Earth Pro, 2021). -----	172
Figura 80. Relación entre la piezometría y las zonas con saturación hídrica aguas abajo del dique para 2009 (elaboración propia a partir de imagen satelital de Google Earth Pro, 2021). -----	174
Figura 81. Almacenamiento mensual de la presa El Cuchillo durante 2021 (elaboración propia, 2022). -----	177
Figura 82. Comportamiento de las variaciones mensuales del almacenamiento registrado y calculado mediante balance hídrico de la presa El Cuchillo durante 2021 (elaboración propia, 2022). -----	179

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Descripción de unidades fisiográficas (INEGI, 1986). -----	22
Tabla 2. Suelos y vegetación (INEGI, 1986). -----	24
Tabla 3. Clasificación de la conductividad hidráulica (CFE, 2021). -----	32
Tabla 4. Aprovechamientos hidráulicos identificados en campo (elaboración propia, 2021). -----	96
Tabla 5. Pozos piezométricos del acuífero China-General Bravo (elaboración propia, 2021). -----	101
Tabla 6. Pozos seleccionados para la elaboración de las cartas piezométricas (elaboración propia, 2021). -----	104
Tabla 7. Pozos seleccionados para la interpolación por IDW del pozo CG-31 (elaboración propia, 2021). -----	108
Tabla 8. Pozos seleccionados para la interpolación por IDW del pozo CG-22 (elaboración propia, 2021). -----	108
Tabla 9. Conversión de coordenadas del pozo CG-31 y los pozos de influencia (elaboración propia, 2021). -----	110
Tabla 10. Conversión de coordenadas del pozo CG-22 y los pozos de influencia (elaboración propia, 2021). -----	110
Tabla 11. Cálculo de distancias entre el pozo CG-31 y los pozos de influencia (elaboración propia, 2021). -----	111
Tabla 12. Cálculo de distancias entre el pozo CG-22 y los pozos de influencia (elaboración propia, 2021). -----	111
Tabla 13. Estimación del nivel piezométrico del pozo CG-31 para el año 2007 mediante interpolación IDW (elaboración propia, 2021). -----	112
Tabla 14. Estimación del nivel piezométrico del pozo CG-22 para el año 2006 mediante interpolación IDW (elaboración propia, 2021). -----	113
Tabla 15. Estimación del nivel piezométrico del pozo CG-22 para el año 2007 mediante interpolación IDW (elaboración propia, 2021). -----	113
Tabla 16. Gastos medios mensuales registrados en la estación hidrométrica Las Enramadas durante el año 2021 (elaboración propia, 2022). -----	121
Tabla 17. Precipitación acumulada mensual registrada en la estación climatológica El Cuchillo durante el año 2021 (elaboración propia, 2022). -----	122
Tabla 18. Evaporación acumulada mensual registrada en la estación climatológica El Cuchillo durante el año 2021 (elaboración propia, 2022). -----	122

Tabla 19. Determinación de los volúmenes mensuales y volumen anual de escurrimiento para el año 2021 (elaboración propia con información del Sistema de Información Hidrológica (SIH-CONAGUA), 2022). -----	126
Tabla 20. Volúmenes mensuales y volumen anual de precipitación sobre el embalse para el año 2021 (elaboración propia con información del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) de la CONAGUA, 2022). -----	128
Tabla 21. Áreas estimadas del embalse para el año 2021 obtenidas mediante la ecuación de ajuste almacenamiento-área (elaboración propia, 2022). -----	132
Tabla 22. Determinación de la evaporación acumulada mensual corregida mediante el coeficiente de corrección Kp (elaboración propia, 2022). -----	133
Tabla 23. Volúmenes mensuales y volumen anual de evaporación estimados para el embalse de la Presa El Cuchillo durante 2021 (elaboración propia, 2022). -----	134
Tabla 24. Determinación de los volúmenes mensuales y volumen anual de extracción del acueducto El Cuchillo-Monterrey durante 2021 (elaboración propia, 2022). -----	135
Tabla 25. Determinación de los volúmenes mensuales y volumen anual de extracción del acueducto China-Los Aldama durante 2021 (elaboración propia, 2022). -----	136
Tabla 26. Determinación de los volúmenes mensuales y volumen anual de extracción para abastecimiento de agua potable de la presa El Cuchillo durante 2021 (elaboración propia, 2022). -----	137
Tabla 27. Distribución mensual del volumen anual de agua destinado a riego de la presa El Cuchillo durante 2021 (elaboración propia, 2022). -----	137
Tabla 28. Distribución mensual del volumen reportado de trasvase de la presa El Cuchillo durante 2021 (elaboración propia, 2022). -----	139
Tabla 29. Volúmenes mensuales y anual de filtraciones reportados por CONAGUA para la presa El Cuchillo durante 2021 (elaboración propia, 2022). -----	140
Tabla 30. Integración mensual de las entradas y salidas consideradas en el balance hídrico del embalse de la Presa El Cuchillo durante el año 2021 (elaboración propia, 2022). -----	141
Tabla 31. Balance hídrico anual del embalse de la Presa El Cuchillo (elaboración propia, 2022). -----	142
Tabla 32. Comparación entre la variación del almacenamiento estimada mediante el balance hídrico y la variación observada del embalse de la Presa El Cuchillo durante 2021 (elaboración propia, 2022). -----	143
Tabla 33. Profundidades registradas en la sección transversal del río San Juan (elaboración propia, 2022). -----	147

Tabla 34. Estimación del gasto en la sección transversal del río San Juan (elaboración propia, 2022). -----	153
Tabla 35. Registros de almacenamiento de la presa El Cuchillo utilizados para el balance hídrico diario (elaboración propia, 2022). -----	155
Tabla 36. Volumen diario de precipitación directa y evaporación sobre el embalse (elaboración propia, 2022). -----	155
Tabla 37. Volumen diario de escorrentía superficial (elaboración propia, 2022). -----	156
Tabla 38. Volumen diario de extracción mediante las obras de toma (elaboración propia, 2022). -----	156
Tabla 39. Balance hídrico del embalse de la presa El Cuchillo para el periodo comprendido entre el 1 y 2 de octubre de 2021 (elaboración propia, 2022). -----	157
Tabla 40. Comparación de las estimaciones de la variación del almacenamiento del embalse de la presa El Cuchillo (elaboración propia, 2022). -----	158
Tabla 41. Comparación de los gastos estimados mediante el levantamiento de campo y el balance hídrico diario para las condiciones del 1 de octubre de 2021 (elaboración propia, 2022). -----	159
Tabla 42. Condiciones del embalse y las áreas con saturación hídrica (elaboración propia, 2022). -----	163
Tabla 43. Comportamiento mensual del almacenamiento de la presa El Cuchillo durante 2021 (elaboración propia, 2022). -----	176
Tabla 44. Variaciones del almacenamiento registrado y calculado mediante balance hídrico de la presa El Cuchillo durante 2021 (elaboración propia, 2022). -----	178
Tabla 45. Variación anual del almacenamiento de la presa El Cuchillo durante 2021 (elaboración propia, 2022). -----	180
Tabla 46. Comparación entre el gasto de filtración considerado en el balance hídrico y el gasto equivalente del volumen residual (elaboración propia, 2022). -----	181
Tabla 47. Gastos estimados para las condiciones del 1 de octubre de 2021 (elaboración propia, 2022). -----	183
Tabla 48. Comparación de los gastos reportados y estimados asociados al análisis de las filtraciones de la presa El Cuchillo (elaboración propia con información de Andaverde (1999) y Lugo (2018), 2022). -----	185
Tabla 49. Comparación entre el gasto equivalente del volumen residual y el gasto de diseño para el abastecimiento del Área Metropolitana de Monterrey (elaboración propia, 2022). -----	189

RESUMEN

La presa El Cuchillo constituye la principal fuente superficial de abastecimiento de agua potable para la zona metropolitana de Monterrey; sin embargo, desde su puesta en operación se han identificado filtraciones asociadas a las características geológicas e hidrogeológicas del sitio, manifestadas aguas abajo de la cortina y del dique. La presente investigación tuvo como objetivo evaluar su comportamiento, distribución espacial y relación con el flujo subterráneo, estimar la magnitud de las pérdidas de agua asociadas y analizar sus implicaciones sobre el aprovechamiento del recurso almacenado y el suministro de agua potable.

La investigación integró métodos de análisis espacial, hidrogeológico, hidrológico e hidráulico. Mediante imágenes satelitales y Sistemas de Información Geográfica se realizó un análisis multitemporal de las zonas de saturación superficial asociadas a las filtraciones, mientras que el comportamiento hidrogeológico se evaluó cartas piezométricas. Asimismo, se realizó un balance hídrico del embalse y un aforo del río San Juan mediante el método sección-velocidad, con el propósito de contrastar las magnitudes obtenidas mediante procedimientos independientes.

Los resultados muestran la persistencia de zonas de saturación aguas abajo de la cortina y del dique, con correspondencia espacial con la configuración piezométrica y las direcciones preferenciales del flujo subterráneo. Su expresión superficial varía con el almacenamiento del embalse, aunque sin una relación lineal debido a las condiciones geológicas e hidráulicas del sistema. El balance hídrico determinó un volumen residual de 146.598 hm^3 , equivalente a $4.65 \text{ m}^3/\text{s}$; además, el balance hídrico diario y el aforo del río San Juan mostraron magnitudes comparables, complementando la evidencia espacial y piezométrica.

La integración de los resultados confirma un sistema de circulación asociado a las filtraciones y evidencia su importancia hidráulica. Aunque el volumen residual no puede atribuirse exclusivamente a este fenómeno, su gasto equivalente representa el 46.5 % del gasto de diseño de $10 \text{ m}^3/\text{s}$ de la obra de toma El Cuchillo–Monterrey, lo que permite dimensionar su relevancia potencial sin representar una reducción directa equivalente del suministro. Estos resultados proporcionan una base técnica para fortalecer el monitoreo y la cuantificación de las filtraciones y mejorar la gestión de esta fuente estratégica de abastecimiento.

ABSTRACT

El Cuchillo Dam is the main surface water source for the potable water supply of the Monterrey Metropolitan Area (MMA). However, since its commissioning, seepage associated with the geological and hydrogeological characteristics of the site has been identified downstream of the dam and dike. This research aimed to evaluate seepage behavior, spatial distribution, and relationship with groundwater flow, estimate the magnitude of the associated water losses, and analyze their implications for the use of stored water resources and potable water supply.

The study integrated spatial, hydrogeological, hydrological, and hydraulic analyses. Satellite imagery and Geographic Information System (GIS) tools were used to perform a multitemporal analysis of surface saturation zones associated with seepage, while hydrogeological behavior was evaluated using hydraulic head contour maps and groundwater flow directions. In addition, a reservoir water balance and a San Juan River discharge measurement using the area-velocity method were performed to compare the magnitudes obtained through independent approaches.

The results show persistent surface saturation zones downstream of the dam and dike, spatially corresponding to the hydraulic head configuration and preferential groundwater flow directions. Their surface expression varies with reservoir storage, although without a linear relationship due to the geological and hydraulic conditions of the system. The water balance yielded a residual volume of 146.598 hm^3 , equivalent to $4.65 \text{ m}^3/\text{s}$. Furthermore, the daily water balance and San Juan River discharge measurement showed comparable magnitudes, complementing the spatial and piezometric evidence.

The integrated results confirm a groundwater flow system associated with seepage and demonstrate its hydraulic significance. Although the residual volume cannot be attributed exclusively to seepage, its equivalent discharge represents 46.5% of the $10 \text{ m}^3/\text{s}$ design discharge of the El Cuchillo-Monterrey intake structure, providing a reference for its potential significance without representing an equivalent direct reduction in potable water supply. These results provide a technical basis for strengthening seepage monitoring and quantification and improving the management of this strategic water supply source.

CAPÍTULO 1. GENERALIDADES

1.1 Introducción

1.1.1 Las presas como obras de infraestructura

A lo largo del tiempo, el ser humano ha construido barreras sobre el cauce de los ríos, empleando diferentes materiales, con el propósito de almacenar, controlar y/o derivar el agua que fluye por ellos. Dicha barrera, denominada como cortina, tiene como función principal retener el caudal del río para generar un lago artificial conocido como embalse. El volumen de agua almacenado se deposita sobre una superficie extensa de terreno, generalmente de forma cóncava y con características impermeables o de muy baja permeabilidad, denominada vaso, la cual funciona como un recipiente natural.

La cortina, el embalse, el vaso y las obras complementarias (vertederos, compuertas, tomas, entre otras) son elementos que en conjunto constituyen una obra de infraestructura hidráulica denominada presa, cuya función principal es elevar de manera permanente o variable el nivel del cauce de un río, permitiendo la conducción controlada del caudal y el suministro periódico de agua almacenada. En general, este tipo de obras cumple diversos propósitos, entre los cuales destacan el abastecimiento de agua para consumo humano, uso industrial o agrícola, la generación de energía eléctrica, la regulación de caudales y el control de crecientes.

A través del tiempo, las presas han sido construidas con diferentes materiales, de acuerdo con la disponibilidad de recursos económicos, las condiciones geológicas del sitio y la finalidad de la obra. Entre los materiales utilizados se encuentra la madera, el concreto armado y los denominados materiales sueltos o graduados, siendo estos últimos los empleados a nivel mundial debido a su versatilidad y disponibilidad.

Los materiales sueltos o graduados corresponden a materiales naturales que no requieren procesos químicos de transformación, sino que son tratados y colocados mediante procedimientos de compactación. Estos se componen principalmente de arcillas, limos, arenas y gravas, los cuales comúnmente se obtienen en el propio sitio de construcción o áreas cercanas, conservando sus propiedades originales, las cuales son previamente determinadas mediante estudios geológicos y de mecánica de suelos.

A pesar de que estos materiales pueden presentar propiedades adecuadas que garantizan estabilidad, seguridad y durabilidad, también se encuentran sujetos a procesos de degradación asociados al envejecimiento y la erosión, ocasionados tanto por intemperismo como por los mecanismos hidráulicos del flujo de agua almacenada.

Estas condiciones, en conjunto con las propiedades estructurales y litológicas del macizo rocoso sobre el cual se desplanta la presa, constituyen factores determinantes en la generación de fenómenos de filtración, los cuales pueden ocasionar diversos problemas, tales como pérdidas significativas del volumen de agua almacenada, daños estructurales e incluso inundaciones en zonas conurbadas.

Este tipo de fenómeno ha sido observado en diversas presas, particularmente en aquellas cuya cortina está construida con materiales graduados. Si bien no se ha llevado a cabo un seguimiento sistemático y preciso de esta problemática, el monitoreo y análisis del comportamiento de estas obras a lo largo del tiempo resulta fundamental para comprender los mecanismos que controlan las filtraciones y para desarrollar estrategias técnicas que permitan mitigar sus efectos y garantizar la seguridad y funcionalidad de las presas.

1.1.2 La presa “El Cuchillo”

La presa El Cuchillo, construida sobre el río San Juan, se localiza aproximadamente a 3 km al noroeste de la cabecera municipal de China, en el estado de Nuevo León. Esta obra hidráulica está compuesta por una cortina de materiales graduados de 4,480 m de longitud y 44 m de altura máxima, con un tramo central de 320 m de longitud, conformado por una sección de gravedad de concreto en la que se encuentra alojada la estructura vertedora. La cortina se prolonga hacia el lado izquierdo mediante un dique de los mismos materiales, el cual presenta una longitud de aproximadamente 6,000 m y una altura máxima de 35 m. La presa cuenta además con tres obras de toma y su vaso posee una capacidad total de almacenamiento de 1,784 millones de metros cúbicos (CONAGUA, 2023).

Esta presa fue destinada principalmente al abastecimiento de agua para la ciudad de Monterrey y su zona metropolitana, así como a los municipios de China, General Bravo, Doctor Coss y Los Aldama, en el estado de Nuevo León. Asimismo, contribuye al riego

de aproximadamente 3,640 hectáreas de terrenos agrícolas pertenecientes al Distrito de Riego Las Lajas. Debido a su capacidad de almacenamiento, es considerada como la principal fuente superficial de abastecimiento de agua potable para el estado y la zona metropolitana de Monterrey, superando el volumen de las presas La Boca (39.50 Mm³) y Cerro Prieto (300 Mm³) (Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey, 2020).

Sin embargo, desde su construcción y puesta en operación se han identificado diversos problemas relacionados con fenómenos de filtración, los cuales se encuentran asociados a las características litológicas y estructurales del macizo rocoso sobre el cual se desplanta la obra. Con el paso del tiempo, estos procesos se han intensificado, observándose fisuras en algunos sectores de la cortina que, en conjunto con las filtraciones, han contribuido a la disminución del volumen de almacenamiento disponible, afectando potencialmente el gasto de suministro respecto al gasto de proyecto. De manera adicional, en las zonas circundantes a la presa se han presentado problemas de inundación y ensalitramiento de suelos, lo cual ha ocasionado afectaciones en terrenos agrícolas y viviendas de la población de China, Nuevo León.

La interacción entre las características litológico-estructural del macizo rocoso y la carga hidráulica variable generada por el volumen de agua almacenado ha favorecido el desarrollo progresivo de estos fenómenos de filtración presentes. Por ello, resulta necesario documentar la ubicación y comportamiento de dichas filtraciones, estimar la magnitud del agua que se pierde por este proceso y determinar las afectaciones o impactos que se están generando en las áreas circundantes a la presa.

La presa El Cuchillo fue construida entre 1990 y 1994. Desde su puesta en operación se han desarrollado diversos estudios y análisis, entre los que destacan: la determinación de las propiedades litológicas y estructurales del macizo rocoso donde se desplanta la cortina de la presa y su dique (Navarro et al., 1997); la estimación de las evaporaciones mensuales durante la operación de la presa (Campos, 1997), el estudio hidrogeológico del dique natural de la presa (Navarro, 1996), la determinación de los mecanismos de filtración mediante métodos geológicos y geofísicos (Andaverde, 1999), la evaluación del riesgo que se podría presentar aguas abajo en función de las

políticas de operación a largo plazo (Huerta, 2017), y la revisión hidrológica de la presa ante la influencia de fenómenos hidrometeorológicos extremos (Treviño, 2011).

En el presente trabajo, mediante la aplicación de métodos de mapeo, análisis hidrogeológico e hidrológico, se pretende documentar las filtraciones actuales existentes, estimar el gasto asociado a dichas filtraciones y analizar los flujos hidrodinámicos presentes en el acuífero desarrollado en los depósitos de piso de las formaciones terciarias.

Con base en los resultados obtenidos, se busca proponer medidas de saneamiento orientadas a reducir el gasto de filtración, y, con ello, disminuir los impactos asociados a este fenómeno. De igual manera, se pretende contribuir a la prevención de posibles fallas hidráulicas y a la mejora en la gestión del recurso hídrico disponible, mediante la recuperación potencial de una fracción del agua actualmente perdida por filtración, lo cual podría contribuir al fortalecimiento del abastecimiento de agua potable para la zona metropolitana de Monterrey.

1.2 Antecedentes

1.2.1 Estudios e investigaciones en presas de tierra

El campo de la investigación ha tenido una participación fundamental en el desarrollo y análisis de las obras hidráulicas de captación superficial, con el objetivo de comprender su funcionamiento y proponer soluciones a los diversos problemas que se han presentado a lo largo del tiempo. A continuación, se presenta una síntesis de investigaciones y conferencias relevantes desarrolladas a nivel nacional e internacional relacionadas con el comportamiento de presas de materiales sueltos y los fenómenos de filtración asociados.

En 2011 se celebró la *Pan-Am CGS Geotechnical Conference*, en la cual X. Liu presentó resultados relacionados con el análisis de estabilidad de taludes constituidos por materiales esencialmente granulares. Los resultados mostraron la importancia de considerar dos aspectos fundamentales en el análisis de estabilidad de taludes granulares: las fuerzas de filtración y la sumersión. Igualmente, se observó que, al prevalecer variaciones en la permeabilidad entre diferentes capas de suelo, aunque en pequeñas proporciones, pueden modificar el patrón de flujo del agua, y en algunos

casos de manera significativa, lo cual repercute en la disminución de los factores de seguridad. Por esta razón, se recomienda realizar análisis de flujo y potencial de falla en taludes no homogéneos mediante técnicas de análisis refinadas, como el método de elementos finitos.

El autor señala además que, en muchos casos, al considerar las fuerzas de filtración en los análisis de estabilidad únicamente se toma en cuenta el nivel freático, práctica que puede resultar inadecuada, ya que para un mismo nivel freático pueden presentarse campos de flujo distintos y, por consiguiente, variaciones significativas en las fuerzas de filtración.

En el mismo año, C. Baena (2011), realizó un análisis del proceso de disolución en el cimientado yesífero de una presa como consecuencia de las filtraciones presentes en la estructura. El análisis se llevó a cabo mediante un programa desarrollado en Visual Basic denominado *DISOLUCIÓN2D*. Los resultados obtenidos indicaron que la velocidad de disolución varía inversamente con el porcentaje de material soluble presente en el suelo, mientras que aumenta directamente con la solubilidad del material y con la velocidad de filtración. Asimismo, se observó que la disolución incrementa el coeficiente de permeabilidad del cimientado, lo que a su vez provoca un aumento progresivo del caudal de filtración y de la velocidad de avance del frente de disolución.

En 2012 se llevó a cabo la *XXVI Reunión Nacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica*, en la cual R. Murillo presentó información relacionada con las presas de materiales sueltos y los principales mecanismos de falla asociados a este tipo de estructuras. En su estudio se destaca que numerosos eventos de ruptura o situaciones de riesgo en presas no siempre son reportados, ya sea por descuido en la operación o por temor a posibles sanciones derivadas de modificaciones en las estructuras hidráulicas, sobre todo por la obstrucción de los vertederos. No obstante, las revisiones posteriores a los eventos permiten en muchos casos identificar la causa principal de la falla o incidente. En particular, se menciona que, en algunos casos de desbordamiento, cuando no son evidentes las huellas de erosión en la corona, el evento puede confundirse con fenómenos de tubificación si la ruptura se localiza en un solo punto.

Por otra parte, se señala que en la región denominada *Cuencas Centrales del Norte* se presentan con mayor frecuencia fallas por tubificación en suelos limosos o arcillosos de baja compresibilidad, mientras que en zonas costeras predominan fallas por desbordamiento asociadas a eventos ciclónicos. Finalmente, se destaca que en aproximadamente una sexta parte de los eventos reportados no se logra determinar con certeza la causa de la falla debido a la falta de observaciones detalladas.

En 2014, D. Santillán desarrolló un modelo para estimar el caudal de agua filtrada a través del cimientado rocoso de una presa bóveda mediante el uso de una red neuronal artificial tipo perceptrón multicapa. El modelo fue diseñado considerando como variables de entrada el nivel de agua en el embalse y tres velocidades asociadas a periodos anteriores, mientras que la variable de salida correspondió al caudal de filtración. Los resultados indicaron que este tipo de modelos permite analizar la influencia de diversas variables externas sobre el caudal filtrado. En consecuencia, si se presenta una desviación significativa en el comportamiento del caudal filtrado bajo condiciones operativas normales, el modelo podría facilitar la detección temprana de posibles anomalías o fallas en la estructura. Por ello, las redes neuronales artificiales se consideran herramientas útiles para el monitoreo y auscultación de presas.

En 2016, A. Velázquez realizó un análisis de las filtraciones y de la estabilidad de taludes en presas de tierra utilizando el software *GeoStudio 2007*. A partir de la interpretación de los resultados obtenidos, se propuso un procedimiento general para el estudio conjunto de las filtraciones y la estabilidad de taludes. El estudio concluyó que la estabilidad de taludes debe analizarse considerando la presa como una estructura integral, identificando todas las fuerzas que actúan sobre las dovelas asociadas a la superficie potencial de falla. De igual manera, para el análisis de filtraciones es necesario conocer las condiciones de entrada y salida de la línea de corriente superior con el fin de seleccionar el método más adecuado para la solución del problema. De esta forma, el análisis de filtraciones y estabilidad depende de las condiciones particulares del sitio y puede realizarse mediante métodos analíticos y herramientas computacionales.

En 2017, M. González et al. realizaron un análisis y evaluación del riesgo asociado a filtraciones en el *embalse Zaza*, ubicado en la provincia de Sancti Spíritus, Cuba. El estudio se basó en el análisis histórico de las fluctuaciones de los niveles de agua del embalse y en la evaluación de la instalación de un nuevo sistema de filtros. Se analizaron tres configuraciones geométricas distintas de filtros y se modeló su comportamiento hidráulico. Los resultados mostraron una disminución superior a 1 m en el nivel freático teórico después de la instalación de los filtros. Además, se observó una reducción significativa en el caudal que atraviesa la cortina y la cimentación de la presa, recomendándose la construcción de filtros tipo prisma debido a su facilidad constructiva. Finalmente, los análisis de estabilidad de taludes indicaron factores de seguridad superiores a los valores mínimos normativos.

En 2018, Y. Santos realizó un análisis de las filtraciones en el cuerpo y la cimentación de la *presa Río Grande*, localizada en Chone, Ecuador. El estudio se desarrolló mediante el uso del software *GGU-SS FLOW 2D*, basado en el método de elementos finitos, complementado con análisis teóricos apoyados en redes de flujo utilizando los criterios de Kozeny y L. Casagrande, así como con la evaluación del factor de seguridad frente a tubificación. Adicionalmente, se recopilaron datos de niveles piezométricos y mediciones de caudales en campo. Los resultados indicaron una buena concordancia entre los valores obtenidos mediante análisis teóricos y los resultados generados por el modelo numérico, principalmente en los valores del caudal de salida y el factor de tubificación, obteniendo en este último, valores aceptables para garantizar la efectividad de la pantalla en la cortina. Así mismo, los materiales presentan un buen comportamiento frente a las filtraciones, obteniendo valores de caudal de aproximadamente 11.00 l/s en el estribo izquierdo y 7.80 l/s en el estribo derecho, para un caudal total de 18.80 l/s a través de los estribos de la presa. Esto sin considerar lo que se filtra a través del vertedor, sitio en el que no se pudieron recolectar datos.

En 2019, M. Hernández realizó una exploración mediante métodos geoeléctricos para la detección de zonas de filtración en la presa *Gonzalo N. Santos*, en el estado de San Luis Potosí, México. En el estudio se emplearon los métodos de *Potencial Espontáneo* (PE), *Perfilaje Electromagnético* (PEM) y *Tomografía de Resistividad Eléctrica* (TRE).

Los resultados demostraron la efectividad de estos métodos en la identificación de zonas de filtración, las cuales se manifestaron como anomalías de baja resistividad (en PEM y TRE) y de potencial negativo en el método de PE. Las anomalías identificadas permitieron detectar diversas zonas de infiltración asociadas a estructuras geológicas y canales de flujo localizados tanto en la cortina como aguas abajo de la presa.

En conjunto, estos estudios evidencian que los fenómenos de filtración en presas de materiales sueltos constituyen un problema recurrente, cuyo análisis requiere la integración de métodos geotécnicos, hidrogeológicos, geofísicos y numéricos. Asimismo, ponen de manifiesto la importancia de realizar investigaciones específicas en cada presa para comprender los mecanismos que controlan el flujo subterráneo y su impacto en la estabilidad estructural y en el funcionamiento hidráulico de las obras.

1.2.2 Estudios e investigaciones en la presa El Cuchillo

La presa El Cuchillo, es una de las obras hidráulicas más importantes de la región, debido a su capacidad de almacenamiento y la disposición final del recurso hídrico que en ella se embalsa. Por esta razón, resulta fundamental mantenerla en condiciones óptimas de operación y realizar un monitoreo constante de su estado estructural e hidráulico. Esta situación ha generado un interés en la observación y registro de su comportamiento mediante diversos trabajos de investigación realizados desde su construcción hasta la actualidad.

Los estudios desarrollados en la presa El Cuchillo pueden agruparse principalmente en dos enfoques de análisis: los estudios geológicos e hidrogeológicos, orientados a comprender las características del macizo rocoso y los mecanismos de flujo subterráneo asociados a las filtraciones; y los estudios hidrológicos, enfocados en el comportamiento del embalse, la evaporación y el análisis de avenidas. A continuación, se presentan algunos de los trabajos más relevantes realizados en cada uno de estos ámbitos.

Geológicos e hidrogeológicos

En 1996, I. Navarro realizó el estudio hidrogeológico de la *Loma Los Pozos*, la cual funciona como dique natural de la presa, durante la fase inicial del llenado del vaso. Para esta investigación se consideraron diversos aspectos geológicos e

hidrogeológicos del área de estudio. Desde el punto de vista geológico, se determinó que el macizo rocoso está constituido por una secuencia alternante de lutitas y areniscas de edad terciaria pertenecientes a la *Formación Mount Selman*.

En cuanto a la situación estructural, se identificó un homoclinal con dirección NNW–SSE, con presencia de zonas de intenso fracturamiento, principalmente de tipo ortogonal, con direcciones paralelas y perpendiculares al rumbo de estratificación y al eje de la cortina, así como un sistema diagonal de fracturas.

Desde el punto de vista hidrogeológico, se determinó que el conjunto de rocas eocénicas constituye un acuífero múltiple compuesto por cinco pisos hidrogeológicos, el cual funciona como un sistema de doble porosidad. Los niveles piezométricos registrados se encuentran en los intervalos de 100–112 msnm y 163–166 msnm. Asimismo, se concluyó que el cambio en el régimen hidrogeológico local, asociado al volumen del embalse y a las propiedades litológico-estructurales del macizo rocoso, favorece la aparición de filtraciones al pie de la cortina, en el dique y en zonas aguas abajo de estas estructuras.

Por otra parte, a partir del análisis geoquímico e isotópico de las aguas subterráneas y superficiales, se determinó que el quimismo de las aguas del río San Juan está controlado principalmente por la litología, la depositación y los procesos de diagénesis de la secuencia eocénica. Estas aguas presentan generalmente un carácter cálcico-bicarbonatado, aunque muestran variaciones estacionales relacionadas con los periodos de lluvia y sequía. Asimismo, el acuífero múltiple contiene aguas del tipo sódico-clorurado, resultado de la disolución de minerales evaporíticos, observándose ligeras variaciones en los contenidos iónicos entre los distintos pisos hidrogeológicos.

Posteriormente, en 1999, I. Navarro et al. analizaron el impacto de las discontinuidades litológicas y estructurales del macizo rocoso en el comportamiento hidrogeológico de la presa. Los autores concluyeron que dichas discontinuidades influyen significativamente en el funcionamiento hidrogeológico del sistema, el cual puede interpretarse como un modelo de doble porosidad, compuesto por porosidad intergranular y porosidad asociada a fracturas. Este comportamiento se refleja en la presencia de filtraciones localizadas al pie y aguas abajo de la cortina y del dique.

Asimismo, se señaló que estas filtraciones pueden tener efectos negativos tanto en el gasto de suministro de agua destinado a la ciudad de Monterrey, como en la estabilidad del conjunto presa–cimiento. Además, se identificó la posible generación de fenómenos de inundación y ensalitramiento en las zonas aledañas a la presa. Por otro lado, se destacó que el cementante calcáreo presente en las areniscas del macizo rocoso favorece los procesos de disolución, lo cual podría contribuir al desarrollo de fenómenos de tubificación o karstificación en el dique y en la cortina de la presa. Adicionalmente, los autores señalaron la posibilidad de cambios ambientales locales, incluyendo modificaciones en la vegetación y en las comunidades biológicas presentes en el área.

También en 1999, J. Andaverde analizó los mecanismos de filtración presentes en la presa mediante la aplicación de métodos geológicos y geofísicos. Los resultados indicaron que la litología del sitio está compuesta por una secuencia alternante de areniscas y lutitas de edad terciaria (Eoceno), pertenecientes al miembro Queen City de la Formación Mount Selman.

En la porción oriental del dique se observó que, como resultado del fenómeno de filtración, las aguas del vaso de la presa (aguas superficiales) se mezclan con las aguas del acuífero (aguas subterráneas) y ascienden a través de las areniscas, favorecidas por condiciones de fracturamiento y alta porosidad. Por otro lado, en la parte occidental del dique se identificaron flujos laterales relacionados con el mecanismo de filtración, los cuales son provocados por la diferencia de nivel entre el agua del embalse y las condiciones topográficas existentes aguas abajo del dique.

El mecanismo de filtración identificado indica que las aguas del vaso fluyen a través de las areniscas siguiendo el rumbo de los estratos hacia el norte, controladas por el gradiente topográfico, y posteriormente ascienden hasta manifestarse en zonas de relieve más elevado. En la zona del dique, el ascenso del agua ocurre principalmente a través de las areniscas, mientras que en la zona de la cortina se relaciona con sistemas de fallas. A partir de estos análisis se estimó que las filtraciones presentes al pie de la cortina y del dique presentan un gasto total aproximado de 250 l/s.

Más recientemente, en 2018, N. Lugo realizó un estudio de las filtraciones en la presa El Cuchillo con el objetivo de diseñar estructuras hidráulicas destinadas a la captación y conducción de dichas filtraciones. Los resultados indicaron que las condiciones topográficas y geológicas del área favorecen el desarrollo de filtraciones tanto subterráneas como superficiales, las cuales se dirigen principalmente aguas abajo hacia el municipio de China, N.L. Así mismo, mediante el aforo de una sección del río San Juan, se estimó un gasto de filtración superficial de aproximadamente 8.53 m³/s.

Hidrológicos

En 1997, D. Campos realizó un análisis estadístico para estimar la evaporación mensual durante la simulación de la operación del sistema de presas El Cuchillo-Marte R. Gómez. Los resultados mostraron que las evaporaciones obtenidas mediante la aplicación de un factor correctivo unitario a la evaporación medida en un evaporímetro clase A en la presa El Cuchillo presentan una gran similitud con las obtenidas mediante el análisis estadístico de los volúmenes evaporados observados en la presa Marte R. Gómez, particularmente al emplear un factor correctivo de 0.80.

Debido a la similitud geomorfológica de los vasos de ambas presas, así como a su ubicación dentro de una misma zona climática, el autor concluyó que el factor correctivo calibrado en la presa Marte R. Gómez puede considerarse aplicable a la presa El Cuchillo para la estimación de evaporaciones.

Posteriormente, en 2011, D. Treviño realizó una revisión hidrológica de las presas Rodrigo Gómez (“La Boca”) y El Cuchillo. Para el caso específico de la presa El Cuchillo, se utilizó información hidrométrica registrada en la estación El Cuchillo, localizada aguas abajo de la cortina, así como registros históricos de avenidas disponibles en el *Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS)* correspondientes al periodo 1927–1992, además del evento registrado en 2010 durante el Huracán Alex.

A partir de la simulación hidrológica se concluyó que la presa es segura desde el punto de vista hidrológico, ya que el volumen de agua transitado durante los eventos analizados no rebasa la capacidad máxima extraordinaria (NAME) ni la capacidad de descarga del vertedor. No obstante, se señaló que la seguridad hidráulica de la presa

depende del adecuado funcionamiento y operación del vertedero. También, se determinó que la presa no presenta problemas asociados a llenados rápidos y que la capacidad asignada para el control de avenidas proporciona tiempo suficiente para la toma de decisiones operativas. Sin embargo, se advirtió que, en caso de presentarse una avenida máxima extraordinaria acompañada de una operación inadecuada del vertedor, podrían generarse inundaciones catastróficas en las poblaciones localizadas aguas abajo debido al desbordamiento del río San Juan.

Finalmente, en 2017, S. Huerta y R. Domínguez realizaron una estimación del riesgo de inundación aguas abajo de la presa El Cuchillo en función de sus políticas de operación a largo plazo. La evaluación se llevó a cabo mediante la simulación del tránsito de la avenida de diseño para distintos periodos de retorno, considerando como condición inicial del embalse los niveles más frecuentes registrados históricamente conforme a las reglas de operación de la obra de excedencias.

Los resultados indicaron que la metodología empleada permite incorporar condiciones más realistas en la estimación de la probabilidad de ocurrencia de eventos extremos, lo cual se traduce en una reducción significativa de los costos estimados por daños potenciales en comparación con análisis convencionales. Asimismo, se determinó que la optimización de la política de operación del embalse permite operar con niveles ligeramente superiores a los históricos sin rebasar el Nivel de Aguas Máximas Ordinarias (NAMO), incrementando con ello el volumen útil de almacenamiento.

Los estudios revisados evidencian que los fenómenos de filtración en presas de materiales sueltos constituyen una problemática recurrente, cuyas implicaciones abarcan aspectos estructurales, hidráulicos y ambientales. No obstante, en el caso particular de la presa El Cuchillo aún existe la necesidad de desarrollar estudios integrales que permitan comprender con mayor detalle el comportamiento hidrogeológico del sistema de filtraciones, estimar la magnitud de las pérdidas de agua asociadas y evaluar su impacto tanto en el entorno ambiental como en el abastecimiento de agua para el Área Metropolitana de Monterrey.

1.3 Justificación

El abastecimiento de agua potable ha desempeñado históricamente un papel fundamental en el desarrollo social, económico e industrial de Monterrey y su zona metropolitana. Este recurso es indispensable para el consumo humano y para el funcionamiento de diversas actividades productivas; sin embargo, el crecimiento urbano y poblacional de la región ha incrementado considerablemente su demanda, generando la necesidad de disponer de infraestructura hidráulica capaz de mantener un suministro confiable y suficiente.

Para atender esta demanda, el Gobierno del Estado de Nuevo León impulsó en 1979 el denominado Plan Hidráulico Estatal, estructurado en distintas etapas que contemplaron la construcción y operación de obras para el almacenamiento, regulación y aprovechamiento del recurso hídrico. Como parte de este sistema se encuentran las presas Rodrigo Gómez (La Boca), José López Portillo (Cerro Prieto) y El Cuchillo-Solidaridad, las cuales constituyen fuentes importantes para el abastecimiento de agua potable del Área Metropolitana de Monterrey.

Las características geológicas e hidrogeológicas de los sitios donde se emplazan las presas pueden favorecer el desarrollo de filtraciones a través de sus estructuras, cimentación o del macizo rocoso circundante. En la presa El Cuchillo, diversos estudios han documentado este fenómeno desde las primeras etapas de llenado del embalse, asociado principalmente con las condiciones litológicas, estructurales e hidrogeológicas del sitio. Como consecuencia, parte del agua almacenada puede desplazarse mediante flujo subterráneo y manifestarse aguas abajo de la cortina y del dique, favoreciendo la formación de zonas de saturación y afectaciones en terrenos circundantes. Asimismo, la pérdida continua de agua disminuye el volumen disponible en el embalse y puede tener implicaciones en la disponibilidad del recurso destinado al abastecimiento.

A pesar de los estudios realizados previamente, resulta necesario integrar información que permita establecer la distribución espacial y temporal de las zonas afectadas, comprender el régimen de flujo subterráneo y cuantificar la magnitud de las pérdidas. El análisis conjunto de estos elementos permite evaluar la correspondencia entre las manifestaciones superficiales, las direcciones preferenciales del flujo subterráneo y las

condiciones hidrológicas del embalse, proporcionando una interpretación más integral del fenómeno.

En este contexto, la presente investigación integra métodos de análisis espacial, hidrogeológico, hidrológico e hidráulico. La delimitación multitemporal de las zonas afectadas y la interpretación piezométrica permiten caracterizar espacialmente las filtraciones y su relación con el flujo subterráneo, mientras que el balance hídrico permite estimar la magnitud de las pérdidas y expresarlas en términos de gasto. Su comparación con el gasto destinado al abastecimiento permite, a su vez, establecer la importancia relativa de estas pérdidas respecto del aprovechamiento del agua almacenada.

Los resultados obtenidos buscan ampliar el conocimiento del funcionamiento hidrogeológico e hidrológico de la presa El Cuchillo y proporcionar una base técnica para el seguimiento de las filtraciones y la gestión del recurso almacenado. De manera complementaria, la información generada puede contribuir al monitoreo de la cortina y del dique, así como servir de referencia para estudios posteriores orientados al manejo y posible aprovechamiento del agua perdida por este fenómeno.

1.4 Hipótesis

Las filtraciones presentes en la presa El Cuchillo están relacionadas con el flujo del agua almacenada en el embalse a través del medio geológico, manifestándose en zonas de saturación aguas abajo de la cortina y del dique. Estas filtraciones representan una pérdida cuantificable del agua almacenada, cuya magnitud puede ser relevante en comparación con el gasto destinado al abastecimiento de agua potable para Monterrey.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo general

Analizar y caracterizar el fenómeno de filtraciones presente en la presa El Cuchillo mediante la identificación de las zonas afectadas, el análisis del régimen de flujo subterráneo y la estimación del gasto de agua asociado a las filtraciones, con el fin de evaluar su comportamiento hidrogeológico y sus implicaciones en la disponibilidad del recurso hídrico para el abastecimiento de agua potable.

1.5.2 Objetivos específicos

- I. Documentar y delimitar las zonas afectadas por filtraciones mediante el análisis de imágenes aéreas y la elaboración de cartografía temática, para evaluar su distribución espacial y evolución temporal en relación con las condiciones de almacenamiento del embalse.
- II. Analizar el régimen de flujo subterráneo en el área de estudio mediante la información hidrogeológica disponible y la elaboración de cartas piezométricas, con el propósito de identificar las direcciones preferenciales de flujo y su relación con las zonas de filtración.
- III. Analizar el comportamiento hidrológico del embalse de la presa El Cuchillo mediante un balance hídrico, con el propósito de identificar y cuantificar las pérdidas de agua asociadas al fenómeno de filtración.
- IV. Estimar el gasto de agua asociado a las filtraciones de la presa El Cuchillo, con el fin de establecer un parámetro cuantitativo para el análisis de la magnitud de este fenómeno.
- V. Evaluar la magnitud del gasto asociado a las filtraciones en relación con el gasto destinado al abastecimiento de agua potable a Monterrey, con el fin de determinar su incidencia potencial sobre la disponibilidad del recurso hídrico.

CAPÍTULO 2. CARACTERÍSTICAS DEL ÁREA DE ESTUDIO

2.1 Área de estudio

La presa El Cuchillo, situada sobre el río San Juan, se localiza aproximadamente a 3 km al noroeste de la cabecera municipal de China, en el estado de Nuevo León. Geográficamente se ubica en las coordenadas 25°43' de latitud Norte y 99°17' de longitud Oeste, correspondientes a 471,576.91m E y 2,844,337.57m N en el sistema de coordenadas UTM (Figura 1).

La infraestructura de la presa está constituida por una cortina de materiales graduados con una longitud aproximada de 4,480 m y una altura máxima de 44 m. Hacia el lado izquierdo de la cortina se prolonga un dique construido con materiales similares, el cual presenta una longitud aproximada de 6,000 m y una altura máxima de 35 m.

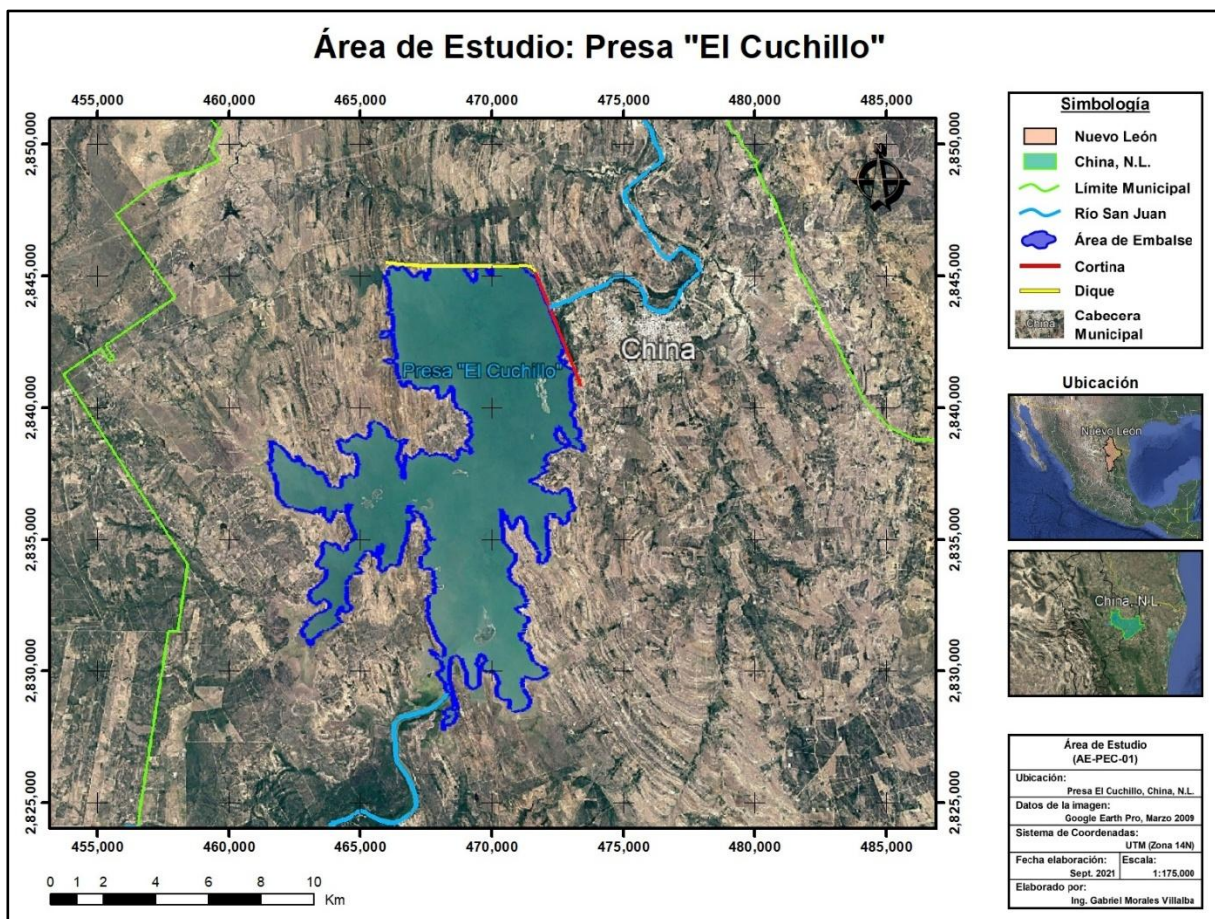


Figura 1. Localización del área de estudio y Presa El Cuchillo (elaboración propia a partir de imágenes satelitales de Google Earth Pro, 2022).

El área de estudio comprende la presa El Cuchillo en su totalidad, incluyendo el embalse, la cortina, el dique y las obras de excedencia, así como el entorno inmediato de la localidad de China, Nuevo León. Poniendo especial énfasis en las zonas localizadas aguas abajo, cercanas al dique y a la cortina, donde se han identificado manifestaciones asociadas al fenómeno de filtración. El mapa del área de estudio se presenta de manera más amplia en el Anexo I.

2.2 Clima

En el estado de Nuevo León predominan, en términos generales, *climas secos y semisecos*, caracterizados por una precipitación pluvial relativamente escasa, con valores medios anuales que oscilan entre 300 y 600 mm. Sin embargo, en algunas regiones se registran precipitaciones anuales superiores a 800 mm, principalmente en zonas asociadas a la influencia orográfica de la Sierra Madre Oriental.

En la región nororiental y suroccidental, separadas entre sí por la Sierra Madre oriental, predominan los *climas de tipo seco y semiseco*, caracterizados por condiciones de baja humedad relativa y precipitaciones moderadas a bajas. Estas condiciones climáticas se encuentran influenciadas por la circulación de masas de aire seco y por las características fisiográficas de la región. Aunque, en áreas menores de la región de la sierra, así como en la zona centro y sur de la entidad, y en gran parte de la cuenca del Río San Juan, se encuentran los climas *semicálido, templado y semifrío*.

En particular, el municipio de China presenta una precipitación media anual entre 500 y 700 mm, mientras que la temperatura media anual oscila entre 20° y 24°C. En esta zona predominan tres tipos de clima: *semicálido subhúmedo con lluvias escasas todo el año* (53%), *semiseco muy cálido y cálido* (41%) y *seco muy cálido y cálido* (6%). De estos, los climas *semiseco muy cálido* y *seco muy cálido* son los que predominan en el área de estudio (Figura 2).

Semiseco muy cálido con lluvia en verano

Se presenta al oriente y norponiente del municipio, caracterizándose por un porcentaje de precipitación invernal entre 5% y 10%. La precipitación media anual oscila de 500 a 700 mm y las temperaturas medias anuales son superiores a 22°C. La precipitación mensual máxima se registra en septiembre, con valores de 160 a 170 mm, y la mínima

en marzo con registros de 10 a 15 mm. Mientras que la temperatura media más alta se presenta en los meses de junio, julio y agosto, con valores entre 27 y 28°C, y la más baja en enero con una temperatura media inferior a 15°C.

Seco muy cálido y cálido

Se presenta, al norponiente, en áreas puntuales y se caracteriza por un régimen de precipitación concentrado en verano y un porcentaje de lluvia invernal entre 5% y 10%. La precipitación total anual oscila entre 400 y 600 mm y la temperatura media anual es superior a 22°C. La precipitación máxima mensual se presenta generalmente en septiembre, con valores entre 110 y 120 mm, mientras que los valores mínimos se registran en los meses de enero, marzo y diciembre, con precipitaciones entre 10 y 15 mm. La temperatura media más alta se observa en julio, con valores entre 28 y 29°C, mientras que la media mínima en enero, con rangos de 14 a 15°C.

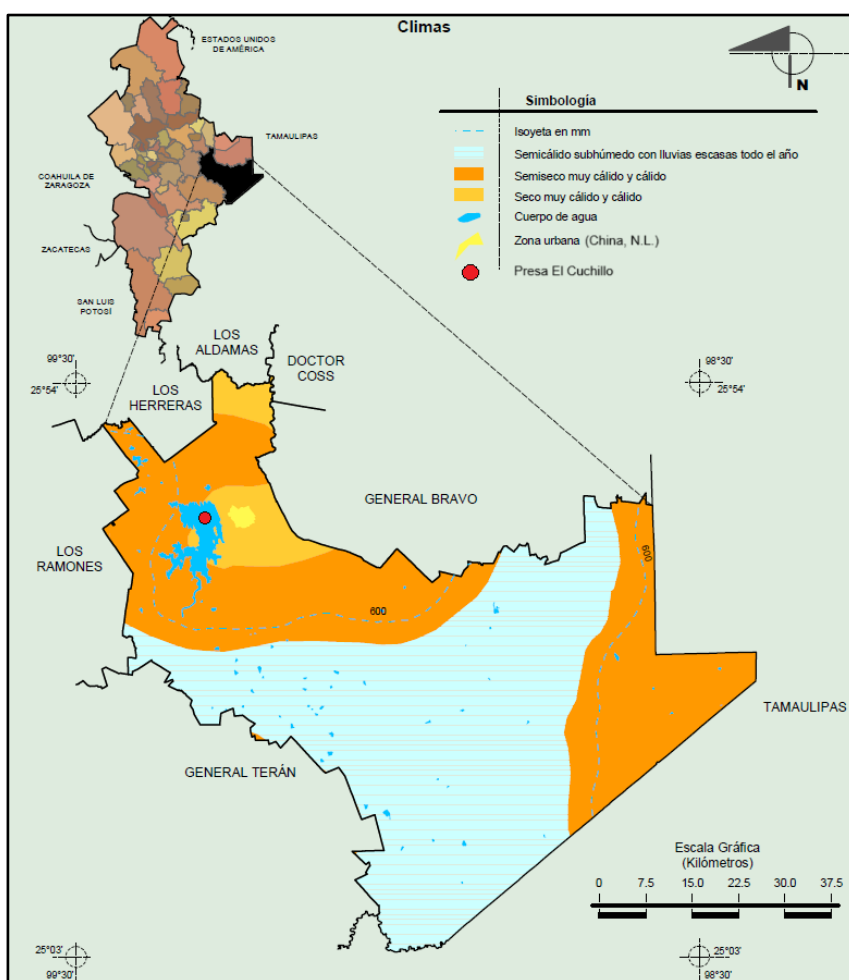


Figura 2. Tipos de clima en el municipio de China, N.L. (modificado de INEGI, 2010).

2.3 Fisiografía

El área de estudio se localiza dentro de la provincia fisiográfica denominada *Grandes Llanuras de Norteamérica*, considerada una de las unidades geomorfológicas más extensas del continente. Dentro del territorio mexicano, esta provincia se extiende sobre porciones de los estados de Coahuila, Nuevo León y Tamaulipas.

A una escala más detallada, el área de estudio se ubica dentro de la subprovincia fisiográfica Llanuras de Coahuila y Nuevo León (Figura 3), caracterizada por presentar un relieve predominantemente plano a ligeramente ondulado y por el predominio de materiales sedimentarios.

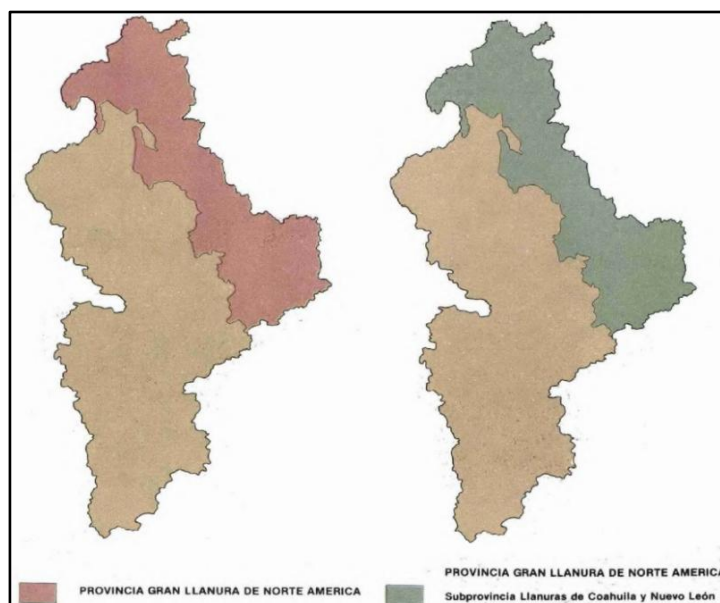


Figura 3. Región fisiográfica de Nuevo León (INEGI, 1986).

2.3.1 Provincia Fisiográfica: Grandes Llanuras de Norteamérica

La provincia fisiográfica de las *Grandes Llanuras de Norteamérica* se extiende desde el sur de Canadá hasta el norte de México, abarcando una amplia región que incluye las provincias canadienses de Alberta y Saskatchewan, así como gran parte del centro de los Estados Unidos. En México, esta provincia se encuentra representada en porciones de los estados de Coahuila, Nuevo León y Tamaulipas (Figura 4).

Sus límites occidentales, ubicados entre los 115° y 105° de longitud oeste, están definidos por las Montañas Rocallosas en Canadá y Estados Unidos, y por la Sierra Madre Oriental en México, mientras que sus límites orientales, ubicados entre los 110°

y 105° de longitud oeste, colindan con la provincia de los Bajos Centrales en Estados Unidos y con la Llanura Costera del Golfo en territorio mexicano.

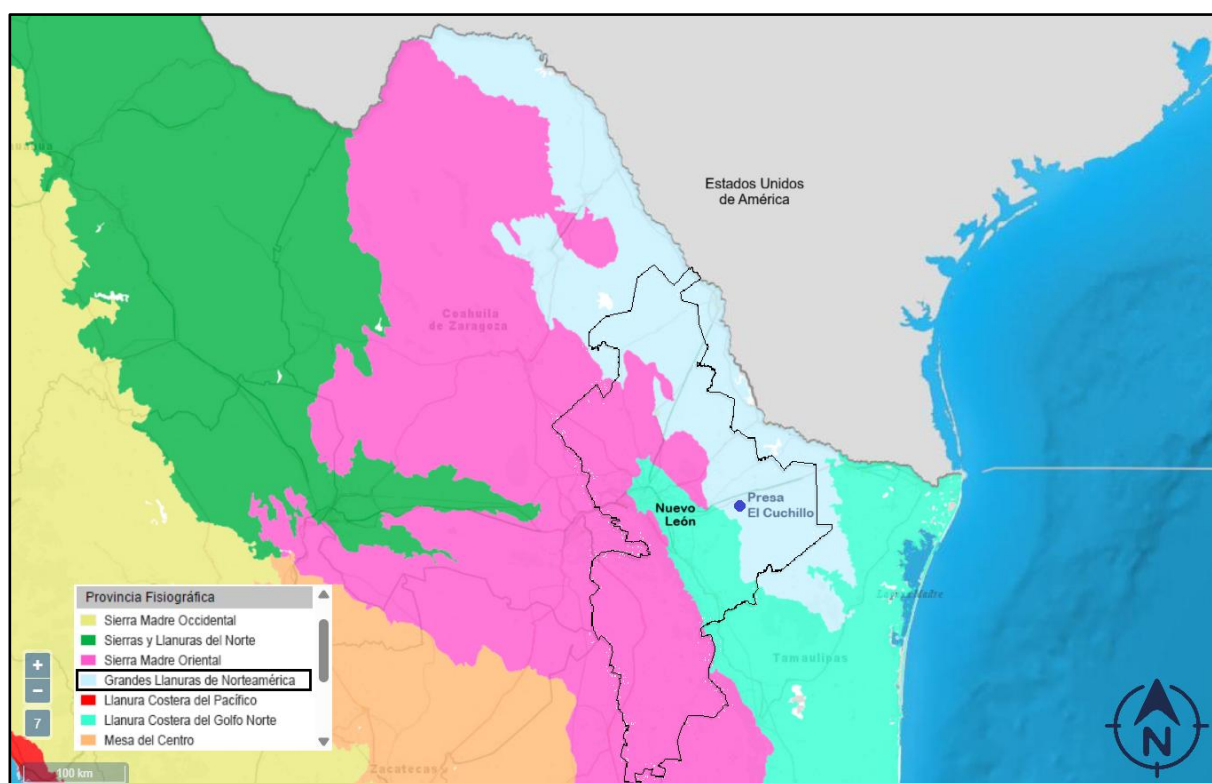


Figura 4. Provincia fisiográfica Grandes Llanuras de Norteamérica (elaboración propia a partir de mapa interactivo de INEGI, 2022).

Topográficamente, esta provincia presenta una inclinación general de oeste a este, con altitudes superiores a 1,000 msnm en su borde occidental que descienden gradualmente hasta aproximadamente 500 msnm hacia el extremo oriental. El rasgo fisiográfico dominante es la presencia de extensas llanuras estructurales y sedimentarias, caracterizadas por superficies relativamente planas cubiertas principalmente por vegetación tipo pradera (INEGI, 1986).

Dentro del territorio mexicano, únicamente una de las subprovincias que conforman esta gran unidad fisiográfica se encuentra representada.

2.3.2 Subprovincia Fisiográfica: Llanuras de Coahuila y Nuevo León

La subprovincia fisiográfica *Llanuras de Coahuila y Nuevo León* limita al norte y al este con el río Bravo, al oeste con la Sierra Madre Oriental y al sureste con la Llanura Costera del Golfo Norte. Esta unidad geomorfológica abarca porciones de los estados

de Coahuila, Nuevo León y Tamaulipas, y se caracteriza por la presencia de extensas llanuras interrumpidas por lomeríos de baja altitud y pendientes suaves y formados principalmente por conglomerados.

Dentro del estado de Nuevo León, esta subprovincia abarca una superficie aproximada de 23,138.39 km². En ella se localizan, en su totalidad, los municipios de Los Aldama, Anáhuac, China, Doctor Coss, General Bravo, General Treviño, Los Herreras, Melchor Ocampo, Parás, y Vallecillo, así como partes de los municipios de Agualeguas, Cerralvo, General Terán, Lampazos de Naranjo y Los Ramones (Figura 5).

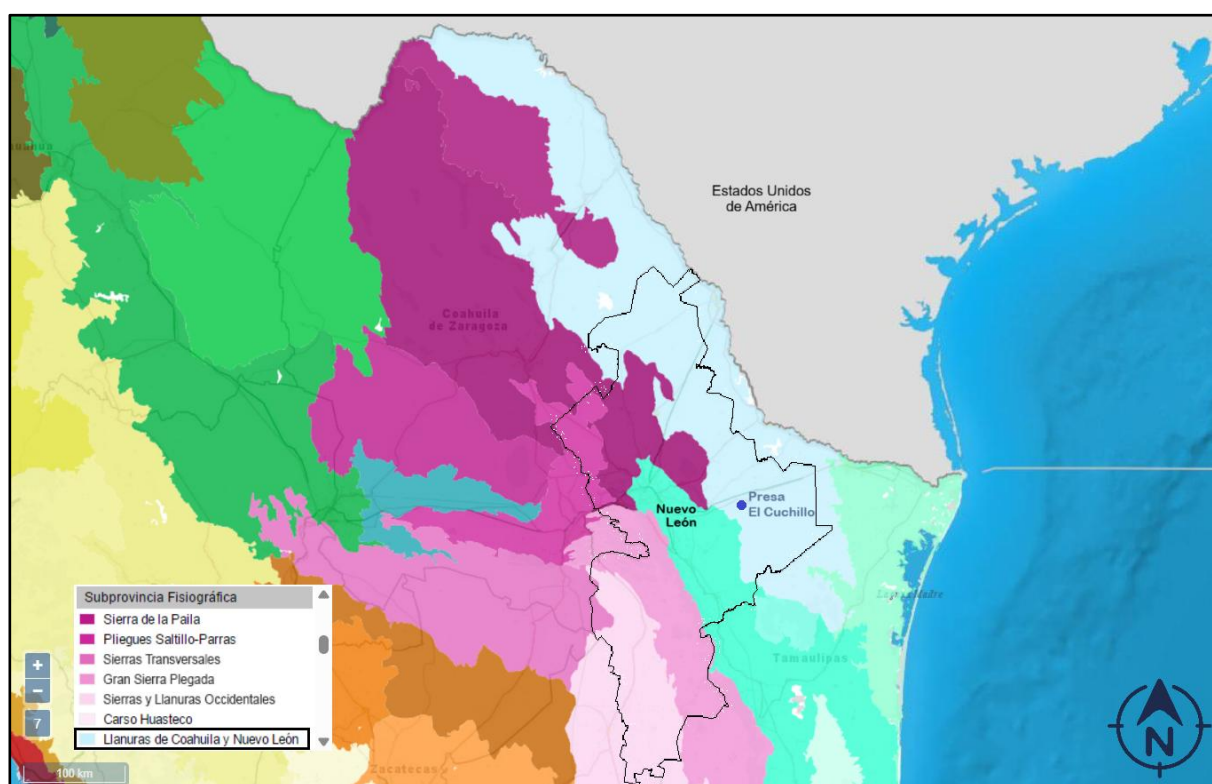


Figura 5. Subprovincia fisiográfica Llanuras de Coahuila y Nuevo León (elaboración propia a partir de mapa interactivo de INEGI, 2022).

Relieve

El relieve dentro de esta subprovincia, particularmente en el estado de Nuevo León, es relativamente homogéneo y se caracteriza por la presencia de extensas llanuras y lomeríos de baja altitud, que en raras ocasiones se ven interrumpidas por sierras bajas, mesetas o valles. El origen de estos sistemas está relacionado con procesos geológicos y geomorfológicos, asociados principalmente a la erosión y sedimentación.

Dentro del estado se identifican diversos sistemas de topoformas, entre los que destacan:

- **Meseta:** de origen residual, localizada entre 800 y 1,000 msnm, con superficies relativamente planas y escarpas abruptas.
- **Lomerío suave con llanuras:** de origen sedimentario, localizado entre 500 y 800 msnm, caracterizado por pendientes suaves.
- **Gran llanura aluvial con lomeríos:** de origen aluvial, localizada entre 300 y 500 msnm, con pendientes prácticamente planas.
- **Llanura de piso rocoso con lomeríos:** de origen erosivo, localizada entre 275 y 300 msnm, con pendientes suaves.
- **Sierra baja:** de origen sedimentario, localizada entre 225 y 310 msnm.
- **Valle:** de origen erosivo, localizado aproximadamente a 105 msnm, con pendientes prácticamente planas.

DESCRIPCION DE UNIDADES FISIOGRAFICAS PROVINCIA DE LA GRAN LLANURA DE NORTEAMERICA SUBPROVINCIA DE LAS LLANURAS DE COAHUILA Y NUEVO LEON							
Sistemas de topoformas	Asociaciones	Fases	Origen	Orientación y rasgos geológicos	Litología	Altura* (m)	Pendientes
Sierra baja			sedimentario	norte-sur	conglomerado	225-310 (m s.n.m.)	suaves
Lomerío suave con llanuras	lomeríos y llanuras		sedimentario marino	noroeste-sureste	conglomerado	500-800	suaves
Meseta			residuo erosivo de rocas sedimentarias marinas	varias	lutita-arenisca	800-1000	superficie suave y escarpas abruptas
Gran llanura aluvial con lomeríos	llanuras aluviales y lomeríos		aluvial		aluvión	300-500 (m s.n.m.)	casi planas
Llanura de piso rocoso con lomeríos	llanuras y lomeríos	lítica y petrocálcica	erosivo fluvial	norte-sur	conglomerado, lutita-arenisca	275-300 (m s.n.m.)	suaves
Valle			erosión fluvial	noroeste-sureste	aluvión	105 (m s.n.m.)	casi planas
* Sobre el nivel del terreno.							

Tabla 1. Descripción de unidades fisiográficas (INEGI, 1986).

Suelos

En esta subprovincia predominan los suelos claros, que son clasificados como xerosoles, principalmente de tipo lúvico, cálcico y háplico, los cuales se distribuyen ampliamente en los diferentes sistemas de topoformas, particularmente en las llanuras aluviales y lomeríos suaves (Tabla 2).

También se presentan suelos poco desarrollados como regosoles calcáreos y éutricos, localizados principalmente en lomeríos, llanuras de piso rocoso y sierras bajas, asociados frecuentemente con litosoles, rendzinas y xerosoles.

En menor proporción se encuentran vertisoles crómicos y pélicos, generalmente de textura arcillosa y con presencia de fases salinas o sódicas, que se presentan en todos los sistemas de topoformas, pero principalmente en llanuras y valles (INEGI, 1986).

Vegetación

La vegetación predominante en esta subprovincia corresponde al matorral espinoso tamaulipeco y al mezquital (Tabla 2), los cuales se distribuyen principalmente sobre suelos vertisoles y xerosoles en la mayoría de las topoformas, con excepción de la meseta, que ocupa una superficie reducida en el noroeste del estado (INEGI, 1986).

El matorral espinoso tamaulipeco se distribuye entre los 80 y 340 msnm y presenta una fisionomía principalmente espinosa, aunque en zonas de sierra baja puede adquirir características de matorral subinermes. Por su parte, el mezquital se desarrolla entre los 75 y 400 msnm y presenta una estructura vertical estratificada, dominada en el estrato superior por *Prosopis sp.* (mezquite).

En el estrato medio se presentan elementos de matorral submontano y de matorral espinoso tamaulipeco. El matorral submontano presenta una fisionomía subinermes y se distribuye entre los 120 y 420 msnm, principalmente en lomeríos asociados a llanuras. Por su parte, el matorral espinoso tamaulipeco, también presente en el estrato medio, muestra una fisionomía variable (subinermes, espinosa o inermes) y se desarrolla en el sector noroeste de la subprovincia, en la llanura de piso rocoso con lomeríos y mesetas, así como en lomeríos suaves y en la gran llanura aluvial.

El estrato inferior está constituido por especies halófitas adaptadas a suelos con salinidad, caracterizadas por un crecimiento amacollado y cespitoso. Estas especies se localizan en pequeñas áreas de llanuras y valles con suelos salinos o sódicos.

Las características fisiográficas descritas influyen directamente en los procesos de escurrimiento superficial, infiltración y circulación del agua subterránea, los cuales son factores relevantes para comprender el comportamiento hidrológico e hidrogeológico

del sistema asociado a la Presa El Cuchillo, particularmente en relación con los procesos de filtración que se presentan aguas abajo de la cortina.

PROVINCIA DE LA GRAN LLANURA DE NORTEAMERICA SUBPROVINCIA DE LAS LLANURAS DE COAHUILA Y NUEVO LEON		
SUELOS Y VEGETACION		
Sistemas de topoformas	Suelos	Vegetación
Sierra baja	Asociación dominante: litosol con rendzina y regosol calcárico Otros suelos presentes: xerosol cálcico y lúvico, vertisol pélico y crómico y regosol éutrico (con fase gravosa o petrocálcica).	Matorral espinoso tamaulipeco y matorral submontano.
Lomerío suave con llanuras	Co-dominio de xerosol (cálcico, lúvico y háplico con fases gravosas petrocálcica y lítica) y vertisol (pélico y crómico, este último con fase salina o sódica). Otros suelos presentes: regosol calcárico y éutrico, litosol, rendzina, castañozem lúvico y cálcico, fluvisol calcárico, feozem calcárico y lúvico, yermosol lúvico y cálcico y solonchak órtico.	Matorral espinoso tamaulipeco, mezquital, matorral submontano, matorral desértico micrófilo, vegetación halófila, pastizal natural, inducido, cultivado y halófilo y selva baja subcaducifolia.
Meseta	Asociación dominante: litosol con regosol calcárico. Otros suelos presentes: xerosol háplico, cálcico y lúvico y vertisol crómico.	Matorral desértico micrófilo.
Gran llanura aluvial con lomeríos	Suelos dominantes: xerosoles del tipo cálcico, lúvico y háplico, asociados entre ellos y con otros suelos como regosol calcárico o vertisol crómico y pélico. Otros suelos presentes: regosol éutrico, litosol, xerosol gypsico, castañozem cálcico, yermosol lúvico y yermosol cálcico.	Matorral espinoso tamaulipeco, matorral submontano, mezquital, matorral desértico micrófilo, pastizal natural, cultivado, inducido y halófilo y vegetación halófila.
Llanura de piso rocoso	Asociación dominante: regosol calcárico con xerosol háplico y calcárico (con fase petrocálcica). Otros suelos presentes: regosol éutrico, rendzina, litosol, vertisol crómico, vertisol pélico, feozem háplico y xerosol gypsico.	Matorral desértico micrófilo, matorral espinoso tamaulipeco, matorral submontano, mezquital, pastizal natural, cultivado y halófilo y vegetación halófila.
Valle	Asociación dominante: vertisol crómico con xerosol lúvico, cálcico y háplico (con fase salina o sódica). háplico, cálcico y lúvico y vertisol crómico.	Matorral espinoso tamaulipeco, mezquital, pastizal cultivado y vegetación halófila.

Tabla 2. Suelos y vegetación (INEGI, 1986).

2.4 Geología

2.4.1 Geología regional

El área de estudio se ubica dentro de la Cuenca de Burgos, una provincia geológica de edad terciaria localizada en el noreste de México, que forma parte de la Planicie Costera del Golfo. Esta cuenca abarca principalmente el estado de Tamaulipas y, en menor proporción, partes de Nuevo León y del noreste de Coahuila, con una extensión aproximada de 45,000 km².

La cuenca está delimitada al norte por el Río Bravo, al este por el Golfo de México, y hacia el sur, suroeste y oeste por las estribaciones orientales de las sierras de Tamaulipas, San Carlos-Cruillas y Burro-Picachos, extendiéndose hasta las proximidades de la ciudad de Nuevo Laredo (Figura 6).

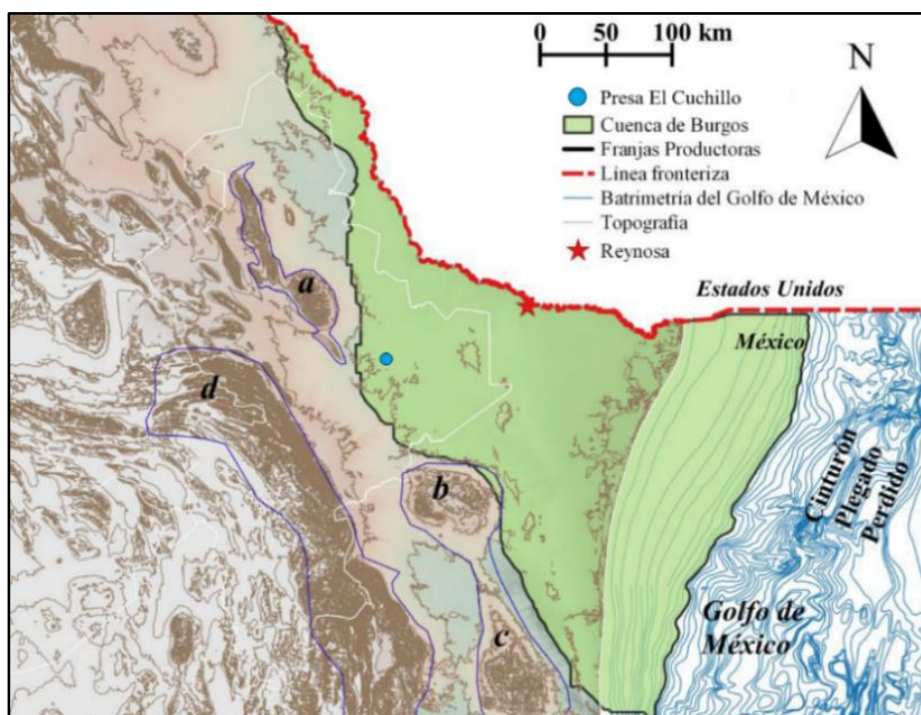


Figura 6. Cuenca de Burgos y altos estructurales que la rodean: (a)Sierra Burro-Picachos, (b)Sierra de San Carlos, (c)Anticlinal Huizachal-Peregrina, (d)Sierra Madre Oriental (modificado de Hernández, 2019).

Desde el punto de vista geológico, la cuenca se formó durante el Paleógeno como consecuencia de los procesos tectónicos asociados a la Orogenia Laramide, evento que produjo la deformación de la plataforma mesozoica del oeste de Norteamérica. En esta región, dicha orogenia dio lugar al levantamiento de diversos elementos

estructurales conocidos como paleoelementos mesozoicos, entre los que destacan El Burro-Picachos, San Carlos-Cruillas y el Anticlinal Huizachal-Peregrina, los cuales conforman el denominado Arco de Tamaulipas.

La historia geológica de la región se remonta al Jurásico Superior (Oxfordiano), periodo en el que comenzó la apertura del Golfo de México. Este proceso dio lugar a la deposición continua de una potente secuencia sedimentaria compuesta por rocas calcáreas, calcáreo-arcillosas y areno-arcillosas, con un espesor superior a 8,000 m, las cuales descansan discordantemente sobre metasedimentos o rocas intrusivas cristalinas del basamento pre-oxfordiano (Navarro, 1996).

Desde el punto de vista estratigráfico, la cuenca se encuentra organizada en cinco franjas alargadas con orientación general norte-sur, correspondientes a depósitos del Jurásico-Cretácico, Paleoceno, Eoceno, Oligoceno y Mioceno, que reflejan distintas etapas de sedimentación (Figura 7). Superficialmente, la cuenca presenta una morfología amplia hacia el norte que se estrecha progresivamente hacia el sur, hasta prácticamente desaparecer contra un alto morfológico, mostrando una topografía predominantemente llana característica de las cuencas sedimentarias.

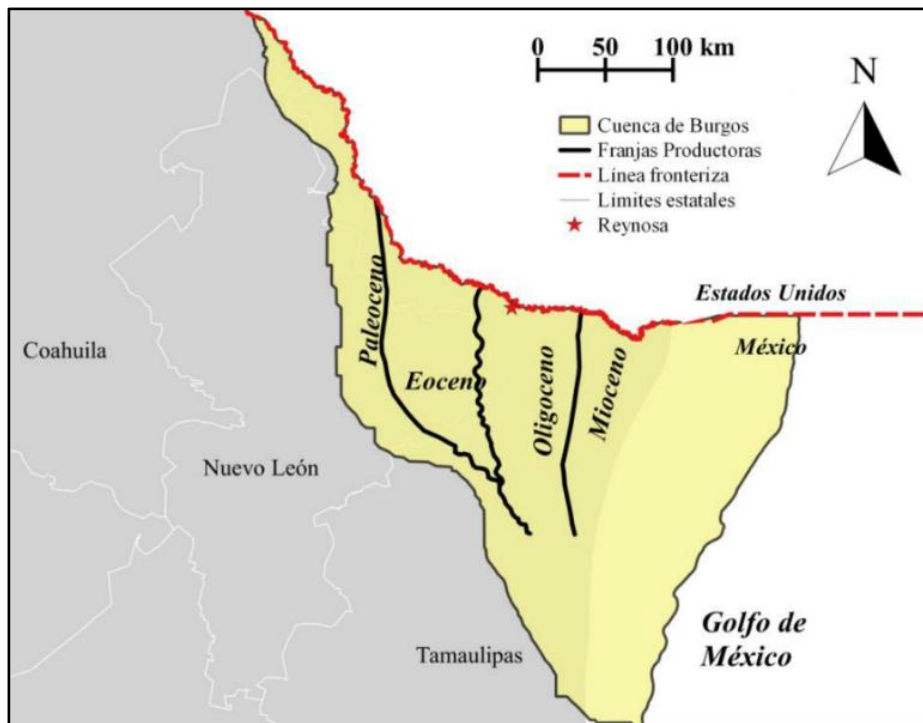


Figura 7. Franjas geológicas de la Cuenca de Burgos (Hernández, 2019).

2.4.2 Geología local

La Presa El Cuchillo se encuentra cimentada sobre el miembro Queen City de la Formación Mount Selman, perteneciente al Grupo Claiborne del Eoceno medio. Esta unidad geológica está compuesta por una secuencia estratigráfica alternante de areniscas y lutitas arenosas (Figura 8), dispuestas en un homoclinal con rumbo general NNW-SSE y un buzamiento suave de 6° a 10° hacia el ENE (Navarro, 1996).



Figura 8. Secuencia de areniscas y lutitas arenosas de la Formación Mount Selman, en un corte sobre la autopista Monterrey-Reynosa, al NE de la presa El Cuchillo (elaboración propia, 2021).

La Formación Mount Selman presenta un espesor variable entre 250 y 1200 m y se subdivide en tres miembros principales: Recklaw, Queen City y Weches. El miembro Queen City se caracteriza por estar constituido principalmente por arenas de cuarzo de grano fino a medio, de tonalidades grises en muestras frescas y rojizas en estado intemperizado, interestratificadas con lechos de lutitas y arcillas con presencia de foraminíferos de ambientes salobres.

Las areniscas, que conforman aproximadamente un 30% de la columna estratigráfica, tienen un espesor variable de 15–20 cm hasta 3–4 m. Estas rocas presentan, en algunos sitios, estructuras sedimentarias como estratificación cruzada, huellas de oleaje (ripple marks) y marcas de arrastre (groove casts), además de nódulos de óxidos de hierro y pequeños fragmentos de madera silicificada (Andaverde, 1999).

Las intercalaciones de lutitas, que conforman el resto de la secuencia, presentan una elevada susceptibilidad a la absorción de agua. Tanto las areniscas como las lutitas han sido afectadas por procesos de intemperismo físico y químico, los cuales han incrementado notablemente su grado de fracturamiento y permeabilidad (Figura 9).



Figura 9. Fracturamiento por intemperismo en estrato de arenisca, afloramiento situado aguas abajo de la cortina de la presa El Cuchillo, China, N.L. (elaboración propia, 2021).

Estratigráficamente, por encima de las unidades del Eoceno se encuentran, en discordancia, conglomerados pliocénicos correspondientes a la Formación Reynosa, que ocupan las partes elevadas del relieve residual. Estos conglomerados están compuestos por cantos y gravas provenientes de rocas mesozoicas y fragmentos de areniscas eocénicas (Andaverde, 1999).

En términos generales, el área de estudio presenta una secuencia eocénica alternante de areniscas y lutitas dispuesta en un homoclinal, cubierta discordantemente por depósitos clásticos fluviales del Pleistoceno en distintas terrazas y, finalmente, por sedimentos holocénicos de limos y gravas de origen fluvial (Navarro, 1996).

La Figura 10 muestra la columna litológica compuesta de 116 m de espesor correspondiente a la vertiente suroccidental de la Loma Los Pozos, que constituye un dique natural en la porción oriental de la presa.

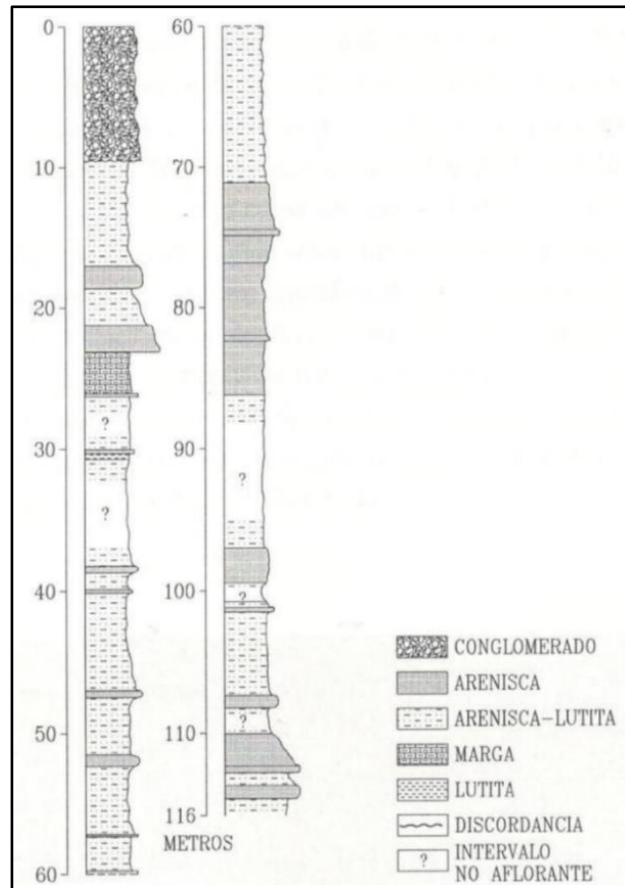


Figura 10. Sección litológica de la Loma Los Pozos (Navarro, 1996).

Geología estructural

Desde el punto de vista estructural, la secuencia de rocas eocénicas en el área de la Presa El Cuchillo se dispone en un homoclinal con inclinación general hacia el este, asociado a los procesos de deformación regional vinculados al levantamiento de la Sierra Madre Oriental y al desarrollo de la Cuenca de Burgos.

Las mediciones estructurales indican que los estratos presentan una orientación relativamente homogénea, con un rumbo promedio cercano a N6°W y un buzamiento aproximado de 9° hacia el noreste, para una población total de 360 mediciones, lo que confirma la baja deformación tectónica de la secuencia (Navarro, 1996).

La Figura 11 muestra el perfil geológico B-B' de la Loma Los Pozos, trazado perpendicular al rumbo general de los estratos aflorantes, en el cual se ha exagerado el buzamiento de las capas con el fin de resaltar su geometría y mantener la relación entre la distancia horizontal y la profundidad.

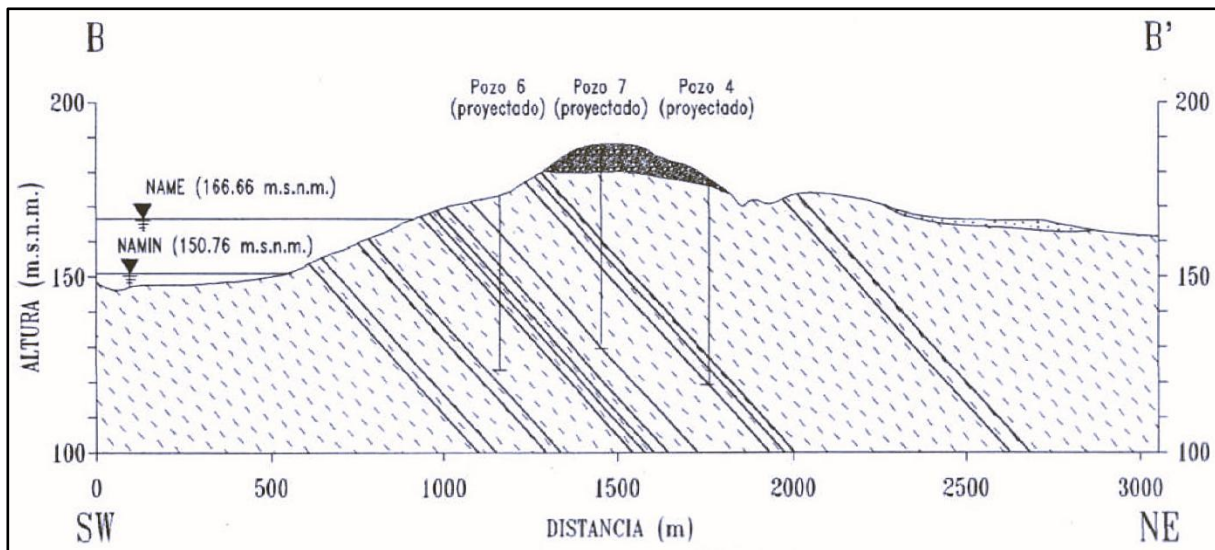


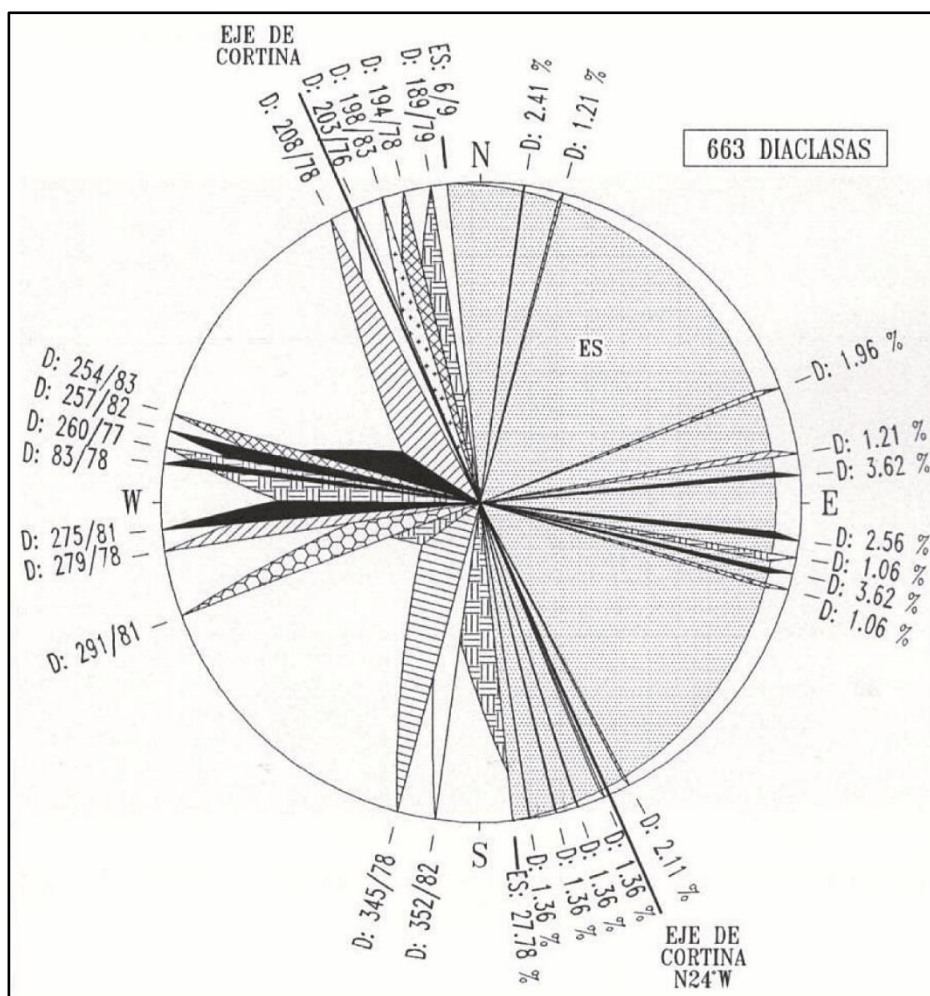
Figura 11. Perfil geológico B-B', Loma Los Pozos (Navarro, 1996).

En cuanto a estructuras mayores, no se han identificado evidencias claras de fallamiento en los afloramientos ni en el análisis de fotografías aéreas. Sin embargo, no se descarta la presencia de estructuras menores en el subsuelo que puedan influir localmente en el comportamiento hidráulico del macizo rocoso.

Uno de los rasgos estructurales más relevantes en el área es la presencia de zonas de fracturamiento, identificadas mediante análisis geomorfológico y fotointerpretación, revelando la existencia de dos tipos principales: formas lineales y circulares.

Estas zonas presentan principalmente trazos lineales, con direcciones predominantes N50°E y N70°W, siendo las primeras las más frecuentes. Su extensión varía desde decenas hasta varios cientos de metros, convirtiendo a la región en un mosaico de bloques que influye en la geometría del drenaje superficial y subterráneo (Navarro, 1996).

Con el fin de sintetizar la orientación de los principales elementos estructurales identificados en la zona de estudio, se presenta un análisis de la distribución de las diaclasas y su relación con el plano de estratificación y el eje de la cortina (Figura 12). Esta representación permite reconocer los sistemas dominantes de fracturamiento y su posible influencia en el comportamiento hidráulico del macizo rocoso.



A escala local, el macizo rocoso presenta un sistema bien desarrollado de diaclasas, organizado en un patrón ortogonal principal, con fracturas paralelas y perpendiculares al rumbo de estratificación, así como un sistema diagonal secundario. Las diaclasas son predominantemente subverticales, con aperturas que varían desde milímetros hasta 4–5 cm, y con rellenos de óxidos de hierro, calcita y, en menor proporción, yeso.

La densidad del fracturamiento es variable, con espaciamentos que van desde decenas de centímetros hasta más de un metro, observándose una mayor intensidad en las areniscas en comparación con los horizontes lutíticos. Asimismo, se ha determinado que la profundidad de penetración de estas discontinuidades alcanza entre 15 y 20 m, tanto a partir de observaciones en campo como de datos de perforación (Navarro, 1996).

Estas características estructurales favorecen el desarrollo de permeabilidad secundaria, particularmente en las unidades arenosas, lo que incrementa la capacidad de infiltración y facilita la circulación del agua a través del macizo rocoso. En este sentido, el sistema de fracturas y diaclasas constituye un factor determinante en los procesos de flujo subterráneo y filtración, especialmente en las zonas aguas abajo.

Por otra parte, los estudios geotécnicos realizados en el sitio de la cortina y el dique (CONAGUA, 1993) indican que el intemperismo alcanza profundidades de hasta 15 m. En estos materiales afectados, de acuerdo con los resultados de los ensayos, se presenta una conductividad hidráulica (permeabilidad) promedio de 5×10^{-4} cm/s, lo que los clasifica como un “material conductivo” o “permeable” (Tabla 3).

Conductividad hidráulica (permeabilidad) en cm/s	Clasificación
$\leq 10^{-6}$	Material no conductivo (impermeable).
de 1.00 a 9.99×10^{-5}	Material poco conductivo (poco permeable).
de 1.00 a 9.99×10^{-4}	Material conductivo (permeable).
de 1.00 a 9.99×10^{-3}	Material muy conductivo (muy permeable).
$\leq 10^{-2}$	Material altamente conductivo (altamente permeable).

Tabla 3. Clasificación de la conductividad hidráulica (CFE, 2021).

Por consiguiente, las características litológicas y estructurales del macizo rocoso, así como su grado de intemperismo, condicionan el comportamiento hidráulico del medio, favoreciendo los procesos de infiltración y flujo subterráneo. Estos factores resultan fundamentales para la comprensión del fenómeno de filtración observado en las zonas aguas abajo de la presa.

2.5 Hidrología

El área de estudio se localiza dentro de la Región Hidrológica 24 Bravo-Conchos (RH24), en la Subregión Hidrológica Bajo Bravo, específicamente en la cuenca “Río San Juan 1”. Esta delimitación hidrológica resulta fundamental para comprender la dinámica del escurrimiento superficial, el almacenamiento en embalses y su relación con los procesos de infiltración y filtración en la zona de estudio.

2.5.1 Región Hidrológica 24 Bravo-Conchos

La Región Hidrológica 24 Bravo-Conchos se localiza en el norte de México, entre los 24°50' y 26°40' de latitud norte, y los 97°10' y 101°50' de longitud oeste, abarcando porciones de los estados de Durango, Chihuahua, Coahuila, Nuevo León y Tamaulipas. Limita al norte con los Estados Unidos de América; al sur, con las regiones hidrológicas No. 25 San Fernando-Soto La Marina, 35 Mapimí, 36 Nazas-Aguanaval y 37 El Salado; al este, con el Golfo de México y la región hidrológica 25; y al oeste, con las regiones No. 9 Sonora Sur, 10 Sinaloa y 34 Cuencas Cerradas del Norte.

Cuenta con una superficie aproximada de 229,119.19 km² y está integrada por 37 cuencas hidrológicas agrupadas en cuatro subregiones: Alto Bravo, Seis Tributarios, Medio Bravo y Bajo Bravo (Figura 13) (CONAGUA, 2023).

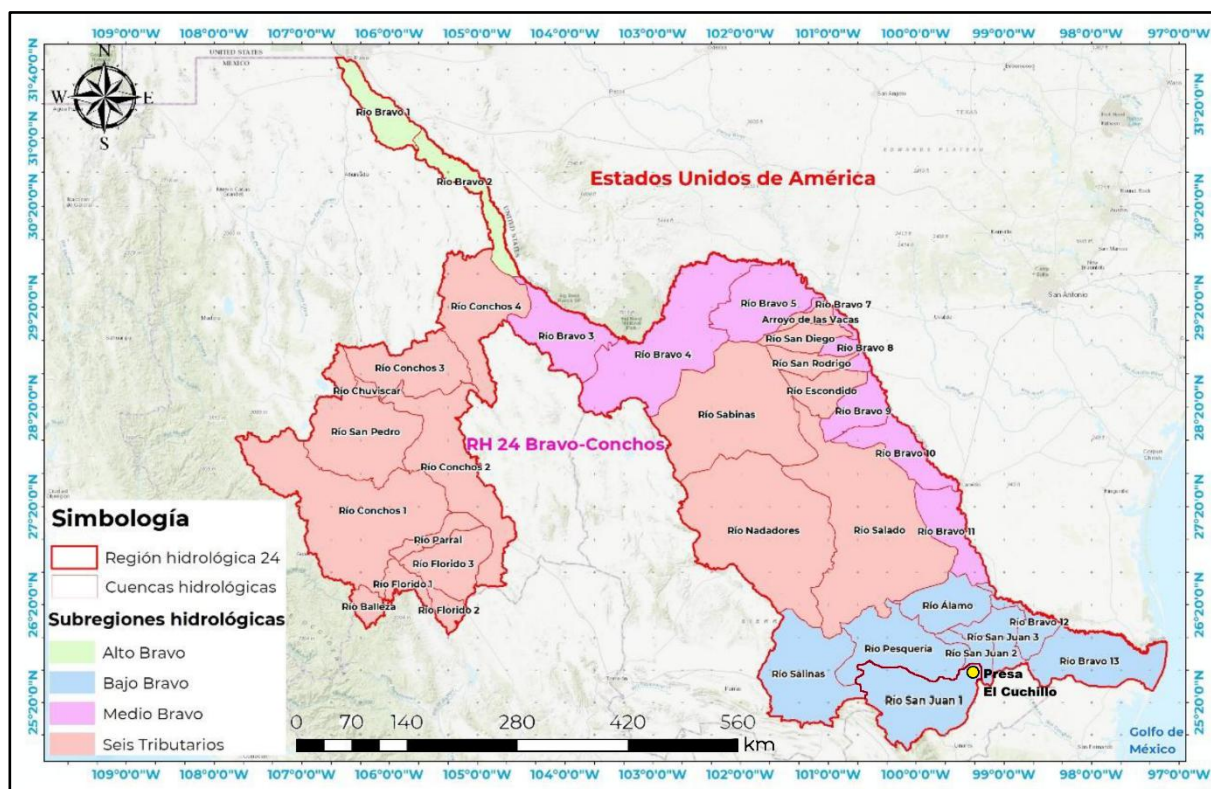


Figura 13. Subregiones hidrológicas de la RH 24 Bravo-Conchos (CONAGUA, 2023).

Debido a su extensión y diversidad fisiográfica, esta región presenta una alta variabilidad en los regímenes de escurrimiento, lo que condiciona la disponibilidad hídrica en sus diferentes subregiones. En particular, en las zonas semiáridas del noreste del país, como el área de estudio, la disponibilidad de agua depende en gran

medida de eventos de precipitación estacionales, lo que repercute directamente en los niveles de almacenamiento de los embalses y, por ende, en la carga hidráulica ejercida sobre las estructuras de retención.

2.5.2 Subregión Hidrológica Bajo Bravo

La Subregión Hidrológica Bajo Bravo está conformada por ocho cuencas: Río Álamo, Río Salinas, Río Pesquería, Río San Juan 1, Río San Juan 2, Río San Juan 3, Río Bravo 12 y Río Bravo 13 (Figura 14).

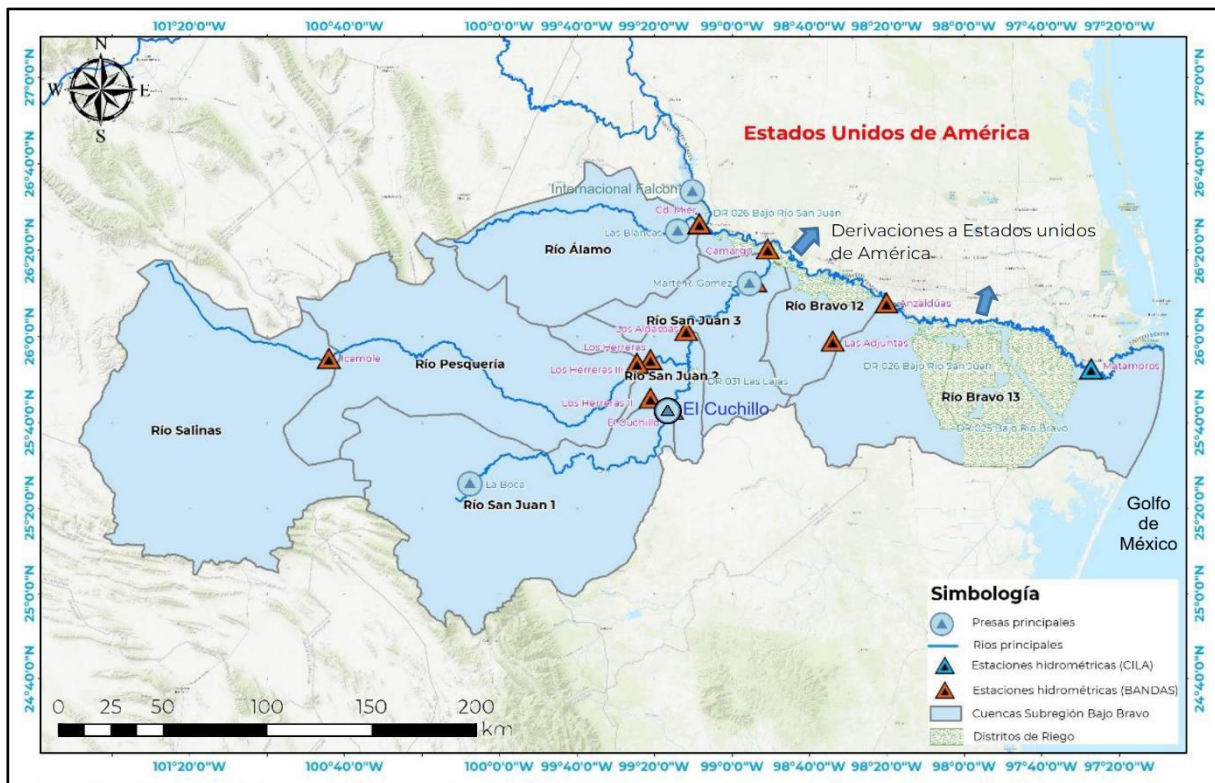


Figura 14. Subregión Hidrológica Bajo Bravo (CONAGUA, 2023).

Su área de aportación se extiende desde la presa Internacional Falcón hasta su desembocadura en el Golfo de México. Hidrológicamente, esta subregión presenta un balance hídrico negativo, con una Disponibilidad Media Anual de -895.939 Mm^3 , lo que la clasifica como una zona deficiente en términos de recursos hídricos (DOF, 2020). Este déficit refleja un desequilibrio entre la disponibilidad natural de agua y las demandas existentes, principalmente para uso urbano y agrícola. En este contexto, la regulación y almacenamiento del recurso mediante presas adquiere un papel estratégico. Sin embargo, también implica la generación de gradientes hidráulicos que

pueden favorecer procesos de infiltración hacia el subsuelo, particularmente en condiciones geológicas y estructurales como las presentes en el área de estudio.

2.5.3 Cuenca Hidrológica “Río San Juan 1”

La cuenca “Río San Juan 1” limita al norte con las cuencas Río Pesquería y Río San Juan 2; al sur, con las regiones hidrológicas No. 25 San Fernando-Soto La Marina y 37 El Salado; al este, con la región hidrológica No. 25 y la cuenca Río San Juan 2; y al oeste, con las cuencas Río Salinas y Río Pesquería, así como con la región hidrológica No. 37 (CONAGUA, 2023).

Comprende una superficie aproximada de 8,618.16 km² y se extiende desde el flanco oriental de la Sierra Madre Oriental hasta la ubicación de la Presa El Cuchillo. La red hidrográfica descarga sus aguas en los ríos Ramos, Pílon y Santa Catarina, los cuales actúan como afluentes del río San Juan (Figura 15).

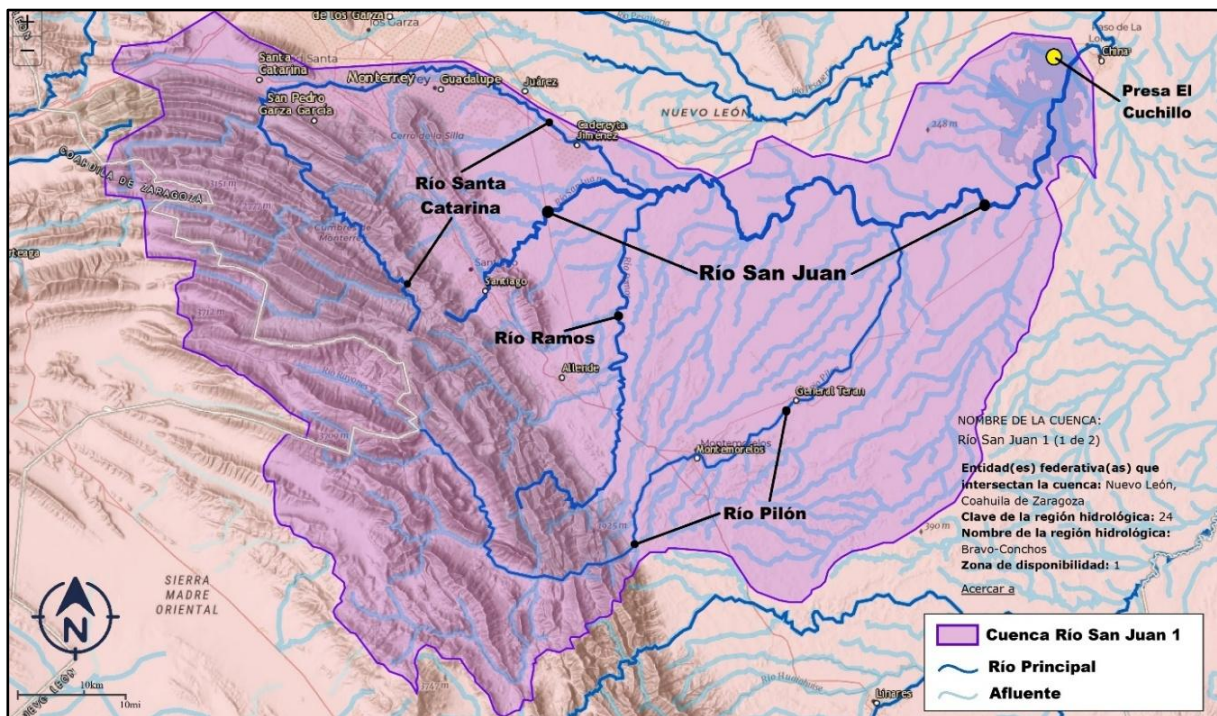


Figura 15. Cuenca hidrológica Río San Juan 1 (elaboración propia a partir de mapa de CONAGUA, 2023).

Desde el punto de vista geomorfológico, la cuenca presenta un sistema de drenaje bien estructurado, con una densidad moderada y patrones de tipo dendrítico y subparalelo, controlados en parte por la litología y la estructura geológica.

Los registros hidrológicos indican una alta variabilidad en los volúmenes de escurrimiento, con valores anuales máximos de 2,776.5 Mm³, promedio de 660.0 Mm³ y mínimos de 30.7 Mm³. Asimismo, se han registrado gastos máximos de hasta 7,500 m³/s, mientras que la avenida de diseño alcanza los 15,080 m³/s para un periodo de retorno de 59 años (Navarro, 1996).

Desde el punto de vista del balance hídrico, la cuenca presenta un déficit, con una Disponibilidad Media Anual de -82.181 Mm³, resultado de la diferencia entre el Volumen Medio Anual de Escurrimiento (181.654 Mm³) y el Volumen Comprometido Aguas Abajo (263.835 Mm³) (DOF, 2020). Esta condición compromete la sostenibilidad de los usos actuales del agua, especialmente frente a la presión urbana creciente. En este contexto, la cuenca alberga gran parte de la población del estado de Nuevo León, incluyendo el Área Metropolitana de Monterrey, cuya demanda de agua continúa en aumento.

Se estima que para el año 2030 la población del estado alcanzará los 7.1 millones de habitantes, lo que implicará un aumento en la demanda de agua de aproximadamente 40 % respecto a los niveles actuales (El Economista, 2023). Este crecimiento implica una presión considerable sobre los sistemas de captación y distribución de agua, particularmente la presa El Cuchillo, que se abastece del río San Juan.

Los principales usos del agua corresponden al abastecimiento público-urbano y a la agricultura de riego, particularmente en el Distrito de Riego 031 Las Lajas. No obstante, la creciente priorización del uso urbano podría afectar la disponibilidad de agua para el sector agrícola, generando tensiones entre usuarios.

Entre los principales retos que enfrenta la cuenca se encuentran la insuficiencia hídrica frente al crecimiento urbano, el conflicto entre los usos urbano y agrícola, la contaminación derivada de descargas y derrames, así como las limitaciones en la infraestructura de tratamiento de aguas residuales. Estas problemáticas evidencian la necesidad de adoptar un enfoque integral en la gestión del recurso hídrico, orientado a garantizar el aprovechamiento sustentable del agua en esta cuenca estratégica.

Por consiguiente, las condiciones hidrológicas de la cuenca, caracterizadas por una disponibilidad limitada y una alta demanda, incrementan la importancia de evaluar los

procesos de pérdida de agua en los sistemas de almacenamiento. En este sentido, las filtraciones en la Presa El Cuchillo representan un factor crítico que puede agravar el déficit hídrico regional, al reducir el volumen útil disponible para el abastecimiento.

2.6 Hidrogeología

2.6.1 Acuífero China-General Bravo (Regional)

El área de estudio se ubica dentro del acuífero China-General Bravo, identificado con la clave 1913 por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). Este acuífero se localiza en la región noreste del estado de Nuevo León, delimitado entre las coordenadas 25°29' y 26°03' de latitud norte, y 99°07' y 99°54' de longitud oeste, cubriendo una superficie aproximada de 2,821.64 km².



Figura 16. Localización del acuífero China-General Bravo (1913) (modificado de CONAGUA, 2024).

En cuanto a sus límites hidrogeológicos, al norte y al este colinda con el acuífero Bajo Río Bravo, mientras que al sureste limita con el acuífero Méndez–San Fernando, ambos

pertenecientes al estado de Tamaulipas. Hacia el sur limita con el acuífero Citrícola Norte; al oeste, con los acuíferos Campo Papagayos y El Carmen–Salinas–Victoria; y al noroeste, con el acuífero Agualeguas–Ramones, todos ellos ubicados dentro del estado de Nuevo León (Figura 16).

Geopolíticamente, el acuífero se extiende parcialmente por los municipios de Los Ramones, China, General Bravo, Doctor Coos, Los Aldamas, Los Herreras, Cerralvo, Marín y Doctor González, en el estado de Nuevo León.

En relación con la geología del subsuelo, con base en la información de geología superficial y cortes litológicos (Figura 17), se ha determinado que el acuífero está constituido principalmente por materiales carbonatados, conformados por rocas calizas con variaciones en su espesor estratigráfico, así como por intercalaciones de lutita–caliza, caliza–lutita, arenisca–lutita y arenisca–yeso. Estas unidades se encuentran cubiertas por secuencias adicionales compuestas por areniscas, limolitas y lutitas con presencia de restos de madera fósil, así como por depósitos conglomeráticos integrados por fragmentos de caliza, arenisca y rocas volcánicas en una matriz areno-arcillosa. En algunos sectores, estos materiales se encuentran parcialmente cubiertos por depósitos aluviales recientes (CONAGUA, 2024).

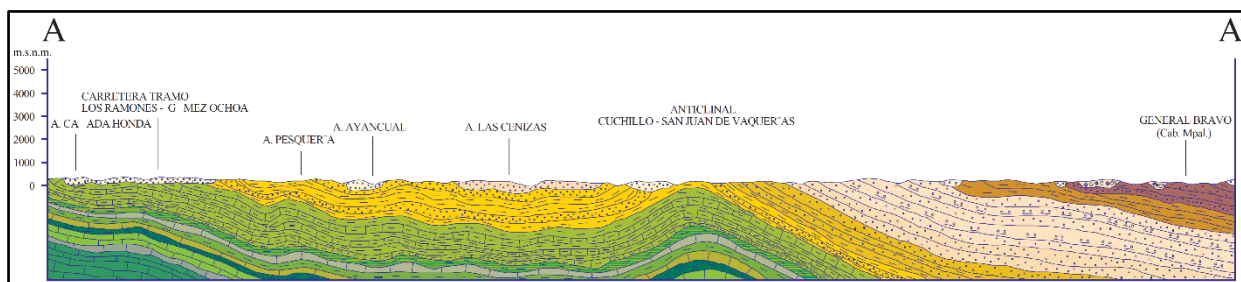


Figura 17. Sección geológica esquemática (obtenida de Carta Geológico-Minera “Río Bravo G14-8”, Esc. 1:250,000, SGM-INEGI, 2008).

Las características geológicas e hidrogeológicas permiten inferir que el acuífero presenta un comportamiento de tipo libre a semiconfinado. Esta condición se debe a que, en la porción occidental del área, los estratos están constituidos principalmente por calizas, lutitas y secuencias intercaladas de lutita-arenisca, lo que limita la interconexión lateral entre los distintos sistemas acuíferos.

Estas propiedades favorecen la presencia de acuitardos, los cuales suelen contener aguas de baja calidad. Sin embargo, también se han identificado zonas con potencial significativo de aprovechamiento de agua subterránea, tanto en cantidad como en calidad, localizadas principalmente en los depósitos aluviales, donde las condiciones de permeabilidad y almacenamiento son más favorables (CONAGUA, 2024).

Disponibilidad Media Anual (DMA)

De acuerdo con la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), la Disponibilidad Media Anual de Agua Subterránea se define como “el volumen medio anual de agua subterránea disponible en un acuífero, al que los usuarios tienen derecho a explotar, usar o aprovechar, adicionalmente a la extracción ya concesionada y a la descarga natural comprometida, sin poner en riesgo los ecosistemas”.

Este parámetro se calcula conforme al procedimiento establecido en la Norma Oficial Mexicana *NOM-011-CONAGUA-2015* (Figura 18), mediante la diferencia entre la Recarga Total Media Anual y la suma de la Descarga Natural Comprometida y el Volumen de Extracción de Aguas Subterráneas.

$$\mathbf{DMA = R - DNC - VEAS}$$

Donde:

DMA = Disponibilidad media anual de agua del subsuelo en un acuífero

R = Recarga total media anual

DNC = Descarga natural comprometida

VEAS = Volumen de extracción de aguas subterráneas

Figura 18. Disponibilidad Media Anual de Agua del Subsuelo en un Acuífero (CONAGUA, 2015).

De acuerdo con la información publicada en el Diario Oficial de la Federación (DOF, 2020), la recarga total media anual (R) del acuífero China-General Bravo se estima en 23.900 hm³/año, mientras que el volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS) es de 18.964 hm³/año y la descarga natural comprometida (DNC) es de 0 hm³/año. Con base en estos valores, la Disponibilidad Media Anual (DMA) de agua subterránea se calcula en aproximadamente 4.936 hm³/año.

Este balance hídrico positivo indica que, para el periodo evaluado, el acuífero presenta condiciones de disponibilidad moderada, lo que sugiere un estado de aprovechamiento

relativamente sustentable, aunque sujeto a variaciones en la recarga y en los niveles de extracción.

2.6.2 Acuífero de la Loma Los Pozos (Local)

A escala local, el comportamiento hidrogeológico en el área de la presa El Cuchillo está controlado por la interacción entre las características litológicas, el grado de fracturamiento del macizo rocoso y la carga hidráulica impuesta por el embalse.

En 1996, durante la fase inicial del llenado de la presa El Cuchillo, I. Navarro realizó el estudio hidrogeológico de la Loma Los Pozos, la cual funciona como dique natural de la presa. Con base en la geología superficial, los niveles piezométricos registrados en pozos de monitoreo y los resultados de análisis hidrogeoquímicos e isotópicos, se identificaron dos unidades hidrogeológicas principales: un acuífero múltiple y un acuífero colgado (Figura 19).

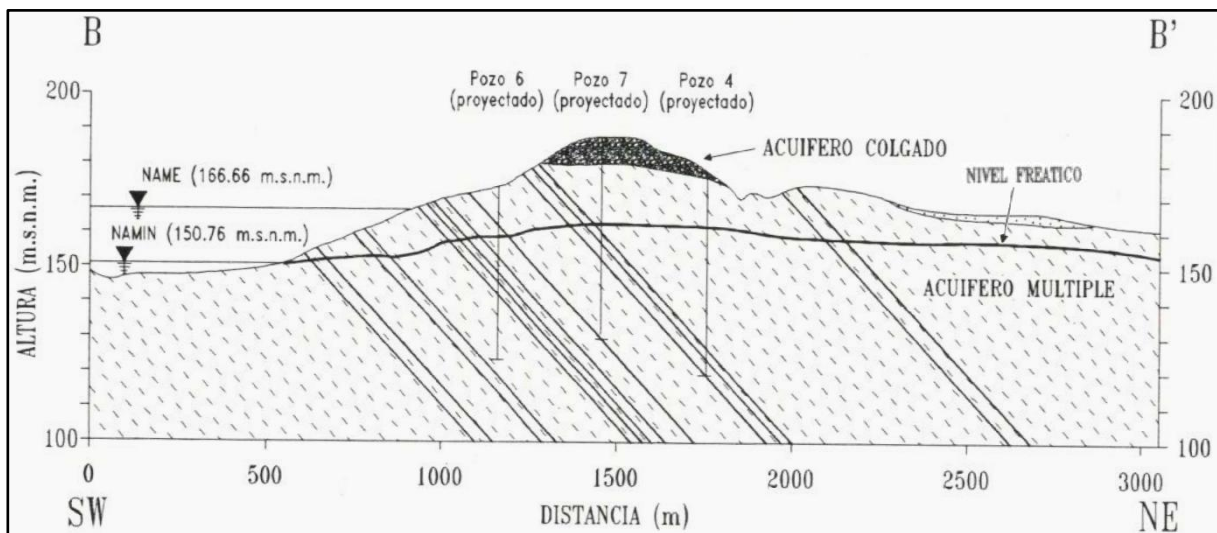


Figura 19. Unidades hidrogeológicas, Loma Los Pozos, China, Nuevo León (Navarro, 1996).

Acuífero múltiple o de pisos

El acuífero múltiple está constituido por una secuencia alternante de areniscas y lutitas de edad eocénica, en donde la dinámica hidráulica está fuertemente condicionada por las propiedades litológicas y estructurales de los materiales que la componen.

Los estratos de arenisca actúan como horizontes hidráulicamente conductores (acuíferos), debido a su mayor porosidad intergranular, mientras que los paquetes de lutitas funcionan como acuitardos o acuitardos, restringiendo el flujo del agua.

La disposición ligeramente inclinada de la secuencia de rocas constituye un factor crucial en la dinámica del sistema (Figura 20), ya que favorece el desarrollo de gradientes hidráulicos. De este modo, al incrementarse el nivel del embalse, se produce un aumento lateral en la presión hidrostática, generando variaciones escalonadas en los niveles piezométricos de los distintos horizontes acuíferos (Navarro, 1996).

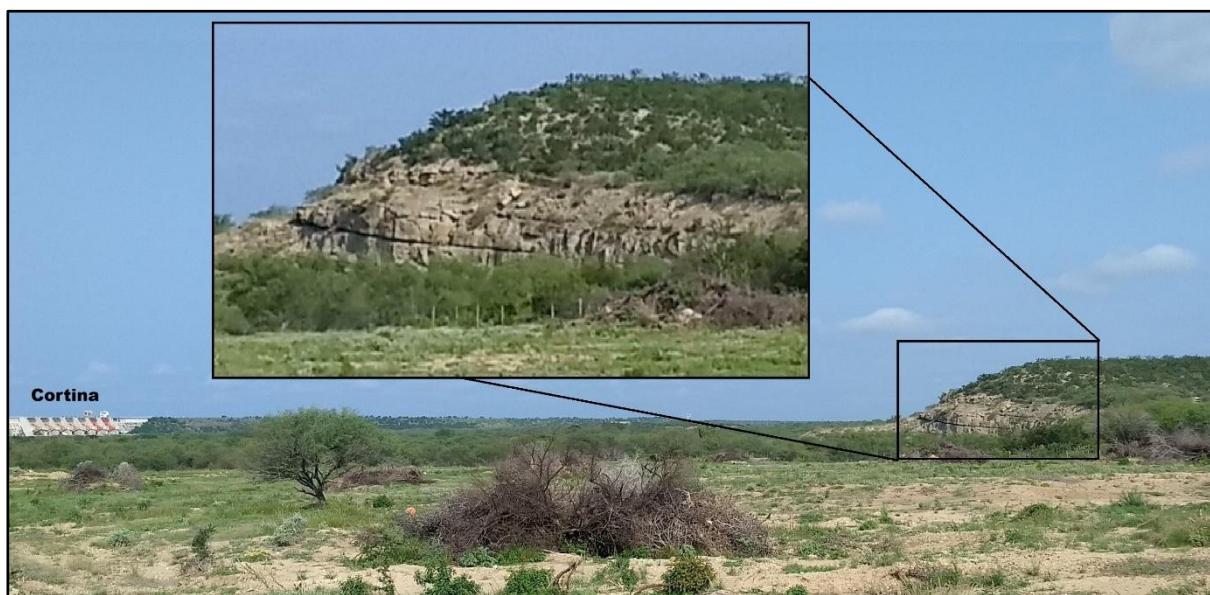


Figura 20. Afloramiento donde se distingue la posición ligeramente inclinada de la secuencia alternante de rocas que conforman la unidad geológica del área de estudio, zona aguas abajo de la cortina (elaboración propia, 2021).

Para interpretar adecuadamente el comportamiento de esta unidad, el sistema debe analizarse bajo un modelo de doble porosidad, en el cual se distingue entre la porosidad intergranular y la porosidad de fractura.

La porosidad intergranular es mayor en las areniscas que en las lutitas, pero la porosidad de fractura, particularmente desarrollada en los estratos de arenisca, juega un papel crucial en la conductividad hidráulica del acuífero. Además, la presencia de zonas de fracturamiento en el acuífero multiplica las posibles configuraciones hidrodinámicas internas.

La porosidad intergranular es mayor en las areniscas que en las lutitas; sin embargo, la porosidad de fractura, desarrollada particularmente en los estratos de arenisca, desempeña un papel fundamental en la conductividad hidráulica del sistema. La

presencia de zonas de fracturamiento incrementa la complejidad del flujo subterráneo, ya que multiplican las posibles configuraciones hidráulicas del medio.

Estas zonas de fractura pueden generar efectos contrastantes sobre la conductividad hidráulica: por un lado, pueden constituir zonas de alta conductividad si las fracturas están abiertas, facilitando el flujo de agua entre los bloques. Por otro lado, pueden actuar como barreras verticales impermeables si las fracturas están rellenas de materiales arcillosos o mineralizadas, aislando hidráulicamente los bloques de roca.

Acuífero colgado

El acuífero colgado está representado por depósitos asociados a una terraza alta que se encuentra en contacto discordante erosivo con las unidades terciarias subyacentes. Este contacto está sellado por una capa de caliche de varios decímetros de espesor, la cual actúa como una barrera impermeable, impidiendo la conexión hidráulica con el acuífero inferior. Los conglomerados que conforman esta unidad presentan una cementación irregular, lo que favorece el desarrollo de porosidad intergranular, debido a que los espacios entre las gravas no cementadas son relativamente grandes en comparación con el volumen total de la unidad.

A pesar de que este acuífero presenta una porosidad relativamente alta, su capacidad de almacenamiento es limitada, ya que su recarga es principalmente de origen meteórico, es decir, depende de la infiltración directa de la precipitación. Esta condición se refleja en la baja concentración de especies iónicas y en el carácter isotópico distintivo de sus aguas (Navarro, 1996). Así mismo, debido a su carácter somero y a su alta porosidad, este acuífero es susceptible a variaciones externas, como cambios en la presión atmosférica y fenómenos asociados a mareas terrestres, lo que puede generar fluctuaciones en los niveles piezométricos.

Sin embargo, su relevancia en la interacción de aguas subterráneas y en los procesos de filtración asociados a la presa es limitada, ya que en la vertiente occidental de la Loma Los Pozos, la base de esta unidad se encuentra a una elevación de 174 msnm, es decir, 8 m aproximadamente por encima del Nivel de Aguas Máximas Extraordinarias (NAME), lo que restringe su interacción directa con el embalse.

CAPÍTULO 3. MARCO TEÓRICO

3.1 Teledetección y análisis espacial

La teledetección y el análisis espacial constituyen recursos fundamentales para el estudio de la superficie terrestre, al permitir obtener, interpretar e integrar información geográfica asociada a distintos fenómenos naturales y antrópicos. Mediante el empleo de imágenes aéreas y satelitales es posible reconocer características y patrones presentes en el territorio, así como analizar su distribución y evolución a lo largo del tiempo. Estas capacidades favorecen el estudio de áreas extensas y proporcionan información complementaria a la obtenida directamente en campo.

La interpretación de imágenes, así como el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG), permite relacionar la información observada con su ubicación espacial, integrar datos procedentes de diferentes fuentes y generar representaciones de los fenómenos analizados. En estudios geológicos, hidrológicos e hidrogeológicos, estas herramientas facilitan la identificación y delimitación de elementos superficiales que pueden estar asociados con las características del terreno y la dinámica del agua.

3.1.1 Fundamentos de la fotointerpretación

La fotointerpretación es una técnica de análisis visual que permite identificar, delimitar y caracterizar elementos de la superficie terrestre a partir de imágenes aéreas o satelitales. Esta herramienta se basa en la observación e interpretación de distintos atributos visuales presentes en las imágenes, tales como el tono o color, la textura, la forma, el tamaño, el patrón espacial y el contexto, los cuales permiten reconocer características físicas y procesos asociados en el terreno (Lillesand et al., 2015).

El análisis fotointerpretativo se fundamenta en el principio de que diferentes materiales y condiciones superficiales reflejan la radiación electromagnética de manera distinta, lo que se traduce en variaciones de color, brillo y contraste en las imágenes (Chuvieco, 2010). Estas diferencias permiten distinguir elementos como cuerpos de agua, zonas de humedad, tipos de vegetación y cambios en el uso del suelo, siendo especialmente útil en estudios geológicos, hidrológicos, ambientales y territoriales (Figura 21).



Figura 21. Áreas de reflexión especular asociadas a cuerpos de agua en fotografía aérea. Lago Green, condado de Green Lake, Wisconsin, EE. UU. (Lillesand et al., 2015).

Para realizar una interpretación adecuada, es necesario considerar de manera específica los principales elementos visuales que conforman el análisis fotointerpretativo, los cuales permiten diferenciar objetos y procesos presentes en la superficie terrestre. Entre estos elementos destacan los siguientes:

- **Tono o color:** corresponde a la intensidad de la radiación registrada por el sensor en una o varias bandas del espectro y está relacionado con las propiedades espectrales de los materiales. Permite distinguir entre superficies secas, húmedas o con presencia de agua.
- **Textura:** se refiere a la variación espacial de los tonos en una superficie, percibida como una apariencia homogénea o heterogénea. Siendo útil para diferenciar áreas uniformes de aquellas con irregularidades asociadas a vegetación, humedad o alteraciones del terreno.
- **Forma:** describe la geometría de los objetos o áreas identificadas. Las formas irregulares suelen asociarse a procesos naturales, como cuerpos de agua someros o zonas de inundación.

- **Tamaño:** permite dimensionar los objetos en función de la escala de la imagen, facilitando la diferenciación entre elementos similares.
- **Patrón espacial:** hace referencia a la distribución y repetición de elementos en el espacio, lo que permite identificar estructuras naturales como redes de drenaje o zonas de acumulación de agua.
- **Contexto o asociación espacial:** considera la relación de los elementos con su entorno. Este criterio resulta fundamental para interpretar correctamente objetos que pueden presentar características espectrales similares, pero que adquieren distinto significado según su localización.
- **Sombras e iluminación:** derivadas de las condiciones de adquisición de la imagen, pueden influir en la interpretación al modificar la apariencia de los objetos. Sin embargo, también pueden ser útiles para inferir relieve, profundidad o altura de ciertos elementos.
- **Dimensión temporal (análisis multitemporal):** en imágenes satelitales, la posibilidad de analizar diferentes fechas permite identificar cambios en el tiempo, lo cual es útil para reconocer dinámicas como variaciones en la humedad, evolución de cuerpos de agua o modificaciones en la cobertura del suelo.

El análisis conjunto de estos elementos permite una interpretación más precisa de las condiciones superficiales, así como la identificación de procesos asociados a la dinámica del medio físico.

En este sentido, la fotointerpretación se consolida como una herramienta fundamental dentro del campo de la teledetección, ya que permite identificar, delimitar y analizar elementos de la superficie terrestre, facilitando la extracción de información cualitativa y semicuantitativa para el estudio de fenómenos naturales y antrópicos.

Es importante destacar que, aunque la fotointerpretación es una técnica robusta, sus resultados dependen en gran medida de la experiencia del analista y de la calidad de las imágenes utilizadas. Por esta razón, los resultados obtenidos deben complementarse y validarse con información de campo, con el fin de reducir la incertidumbre y mejorar la precisión del análisis.

3.1.2 Principios de la teledetección

La teledetección es la ciencia que permite obtener información de la superficie terrestre sin necesidad de contacto directo, mediante el registro y análisis de la radiación electromagnética reflejada o emitida por los objetos. Esta disciplina constituye la base de las técnicas de análisis de imágenes, proporcionando el sustento físico que permite la interpretación visual de las mismas.

El principio fundamental de la teledetección se basa en la interacción de la radiación electromagnética con los elementos de la superficie terrestre. Este proceso comprende la emisión o incidencia de energía, su respuesta al entrar en contacto con los distintos materiales y el posterior registro mediante sensores instalados, generalmente, en plataformas satelitales o aéreas (Figura 22). De acuerdo con sus propiedades físicas y químicas, los elementos observados reflejan, absorben o emiten energía en diferentes proporciones, dando lugar a firmas espectrales características que permiten su identificación y diferenciación (Chuvieco, 2010).

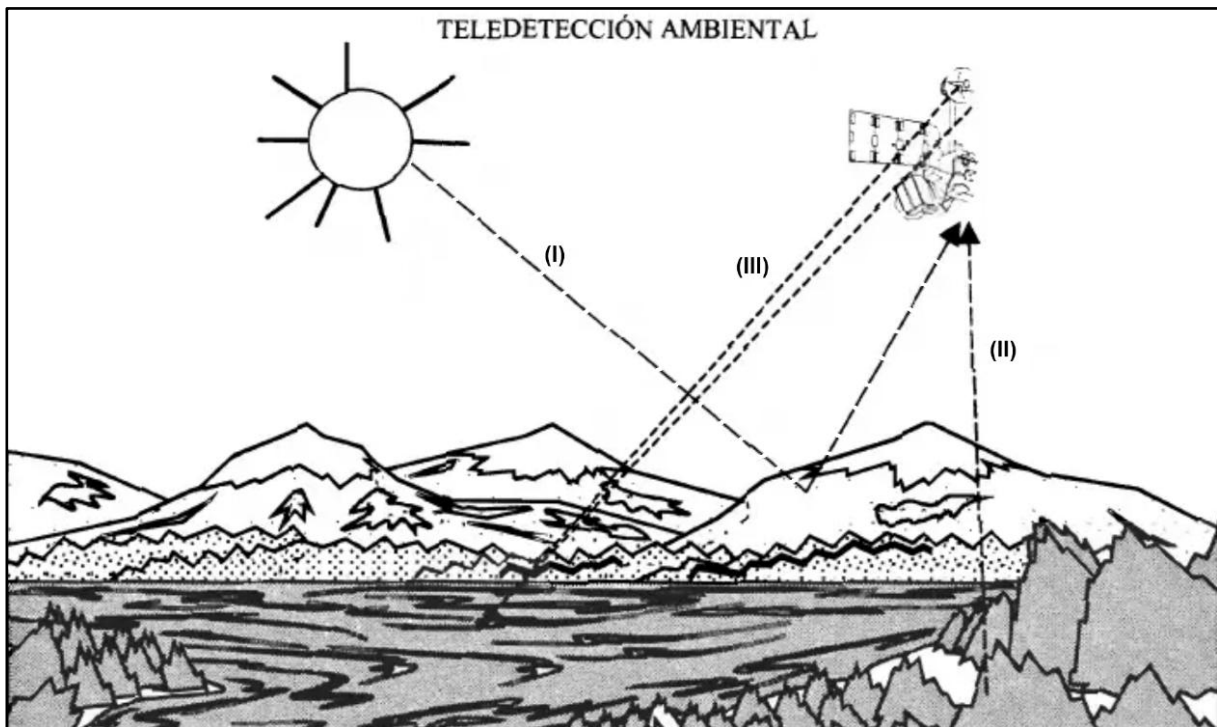


Figura 22. Principales formas de teledetección según la fuente de energía y el tipo de interacción radiación–superficie: (I) reflexión; (II) emisión; (III) reflexión–emisión (Chuvieco, 2010).

En la mayoría de los sistemas de teledetección, la principal fuente de energía es el Sol. La radiación solar incide sobre la superficie terrestre y, dependiendo de las propiedades de los materiales, puede ser reflejada, absorbida o transmitida. La fracción de energía reflejada es captada por los sensores, lo que permite identificar diferentes coberturas y condiciones superficiales a partir de sus características espectrales. Por otro lado, existen sistemas en los cuales el propio sensor actúa como fuente de energía, emitiendo radiación hacia la superficie y registrando la señal reflejada. Estos sistemas, conocidos como activos, permiten obtener información independientemente de las condiciones de iluminación natural, siendo especialmente útiles en situaciones de nubosidad o durante la noche.

En el contexto de la teledetección, los datos obtenidos se representan mediante imágenes generadas por sensores remotos, las cuales presentan distintas resoluciones que condicionan su nivel de detalle y la capacidad para identificar elementos de la superficie terrestre. En términos generales, la resolución de un sistema sensor se define como su habilidad para distinguir detalles y diferenciar objetos dentro de una imagen, lo cual depende del conjunto de características del sensor y no de un solo componente (Chuvieco, 2010).

En el caso de imágenes digitales, como las empleadas en plataformas de análisis espacial y Sistemas de Información Geográfica (SIG), estas resoluciones determinan el nivel de detalle, precisión y aplicabilidad de la información en estudios diversos.

Entre las principales resoluciones se encuentran:

- **Resolución espacial:** corresponde al tamaño mínimo del objeto que puede distinguirse en una imagen y está directamente relacionada con el tamaño del píxel. En imágenes digitales, cada píxel representa una porción del terreno, por lo que, a menor tamaño de píxel, mayor nivel de detalle. Esta resolución es fundamental para la delimitación de áreas y la identificación de elementos superficiales.
- **Resolución temporal:** se refiere a la frecuencia con la que un sensor adquiere imágenes de un mismo lugar. Es importante en el análisis multitemporal, ya que

permite monitorear cambios en la superficie terrestre, como variaciones en la humedad, inundaciones o transformaciones en el uso del suelo.

- **Resolución espectral:** indica el número y la anchura de las bandas del espectro electromagnético que el sensor puede registrar. Una mayor resolución espectral permite diferenciar materiales y coberturas superficiales a partir de sus firmas espectrales, facilitando la identificación de agua, vegetación o suelos con distintas condiciones.
- **Resolución radiométrica:** hace referencia a la sensibilidad del sensor para detectar variaciones en la energía registrada. En imágenes digitales, se expresa como el número de niveles de gris o valores que puede almacenar cada píxel (bits). Una mayor resolución radiométrica permite distinguir diferencias sutiles en la reflectividad de los materiales, lo que mejora la discriminación de zonas con condiciones similares.
- **Resolución angular:** se relaciona con la capacidad del sensor para observar un mismo objeto desde distintos ángulos. Esta característica permite analizar variaciones en la reflectancia dependiendo de la geometría de observación, lo cual puede ser útil para una mejor caracterización de ciertas superficies.

Estas resoluciones no son independientes entre sí, sino que presentan relaciones de compromiso. En general, un aumento en una de ellas puede implicar limitaciones en otras, debido a restricciones técnicas y al volumen de datos generado. Por ello, cada sistema de teledetección ofrece características particulares y está diseñado en función de los objetivos específicos del estudio a realizar.

En conjunto, estas características determinan la utilidad de las imágenes para distintos tipos de análisis, permitiendo identificar y monitorear fenómenos como cambios en la cobertura vegetal, presencia de cuerpos de agua, variaciones en la humedad del suelo y transformaciones en el uso del territorio. En este sentido, la teledetección constituye una herramienta fundamental para el análisis espacial de fenómenos naturales y antrópicos, al proporcionar información continua y comparable en el tiempo.

3.1.3 Aplicaciones en estudios geológicos, hidrológicos e hidrogeológicos

Las técnicas de fotointerpretación y teledetección han sido ampliamente utilizadas en estudios geológicos, hidrológicos e hidrogeológicos debido a su capacidad para identificar patrones espaciales y detectar fenómenos naturales asociados a procesos que ocurren tanto en superficie como en el subsuelo, en grandes extensiones de terreno de manera eficiente.

En el ámbito geológico, estas herramientas permiten identificar rasgos estructurales como fallas, fracturas, lineamientos y patrones geomorfológicos, los cuales influyen en la distribución de esfuerzos, la permeabilidad del medio y el comportamiento del flujo subterráneo. Asimismo, facilitan la delimitación de unidades litológicas superficiales y el reconocimiento de procesos de erosión y sedimentación.

En estudios hidrológicos e hidrogeológicos, la interpretación de imágenes favorece el reconocimiento de zonas con acumulación de agua, áreas con saturación hídrica, humedales, cambios en la vegetación asociados a la presencia de humedad, así como patrones de drenaje superficial. Estos elementos constituyen indicadores indirectos del comportamiento del agua tanto en superficie como en el subsuelo, posibilitando además el análisis de su evolución temporal mediante la comparación de imágenes correspondientes a distintas fechas.

En particular, estas técnicas son de gran utilidad en el análisis de filtraciones en presas, ya que permiten detectar manifestaciones superficiales del flujo subterráneo, especialmente en zonas de difícil acceso o donde la información de campo es limitada.

3.1.4 Sistemas de Información Geográfica (SIG)

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) son herramientas tecnológicas diseñadas para la captura, almacenamiento, análisis y visualización de datos espaciales y georreferenciados. Estos sistemas permiten integrar información proveniente de diversas fuentes, como datos de campo, imágenes satelitales y cartografía existente, facilitando el análisis de fenómenos territoriales complejos (Longley et al., 2015).

Un SIG está compuesto por varios elementos fundamentales, entre los que destacan los datos espaciales, el software especializado, el hardware, los procedimientos, la infraestructura de red y los usuarios, quienes se encargan de interpretar y analizar la información (Figura 23). Su funcionalidad se basa en la capacidad de relacionar atributos con su ubicación geográfica, lo que permite realizar análisis espaciales, identificar patrones y generar representaciones cartográficas.

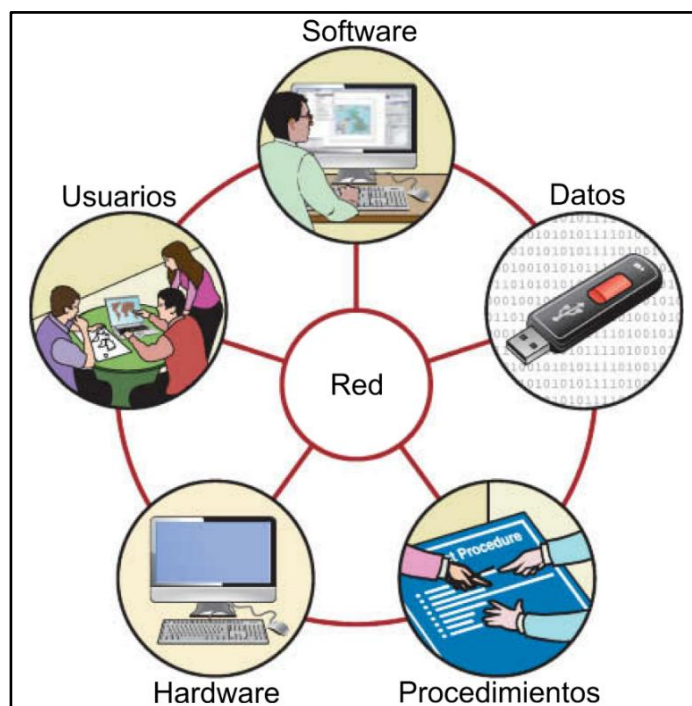


Figura 23. Elementos principales de un Sistema de Información Geográfica (Longley et al., 2015).

En el contexto de estudios ambientales e hidrogeológicos, los SIG permiten:

- Integrar información de campo con datos de percepción remota.
- Analizar la distribución espacial de fenómenos como inundaciones o zonas de humedad.
- Delimitar áreas afectadas mediante la digitalización de polígonos.
- Generar cartografía temática para la representación y comunicación de resultados.

Estas capacidades convierten a los SIG en una herramienta fundamental para el análisis espacial de las filtraciones, al permitir organizar y evaluar de manera sistemática la información obtenida durante la investigación.

3.1.5 Uso de Google Earth Pro en el análisis espacial

Google Earth Pro es una plataforma de visualización geoespacial que permite acceder a imágenes satelitales de alta resolución, así como a información geográfica de distintas regiones del mundo. Esta herramienta facilita la exploración, análisis y representación de datos espaciales mediante una interfaz accesible (Figura 24) y de uso extendido en estudios académicos y técnicos.

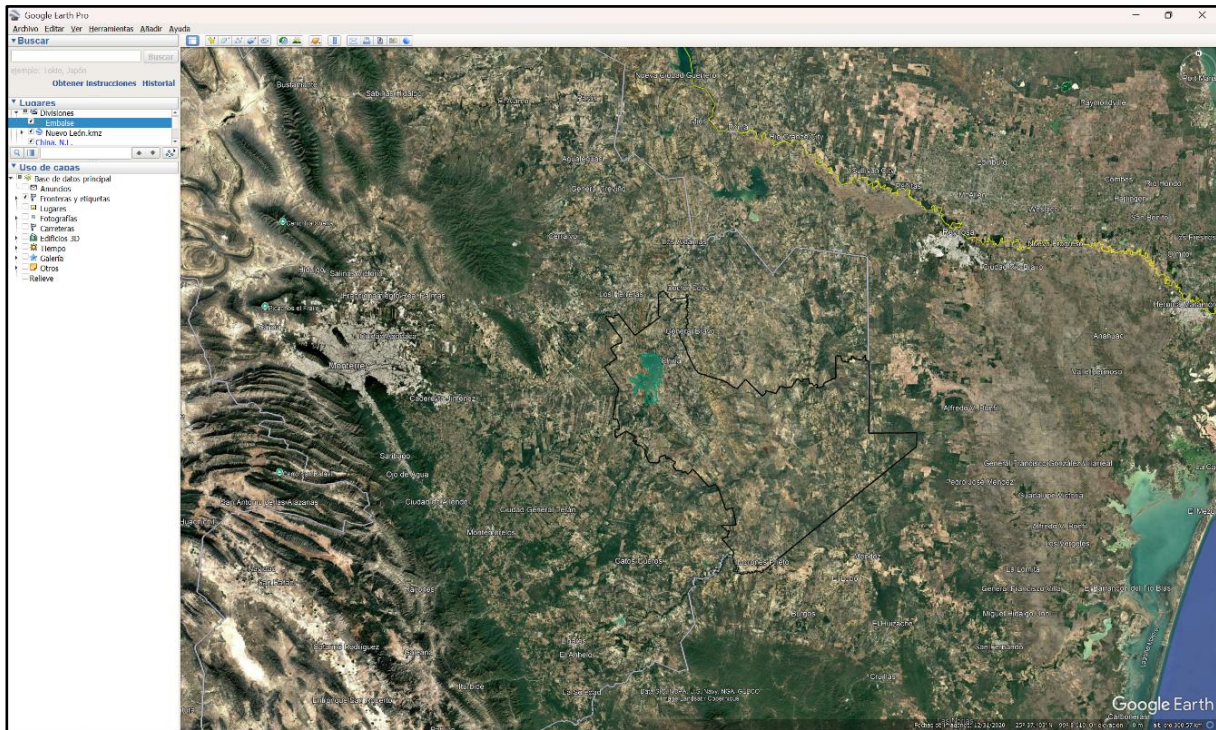


Figura 24. Interfaz general del software Google Earth Pro (elaboración propia, 2022).

Entre sus principales funcionalidades destacan la visualización multitemporal de imágenes, la georreferenciación de puntos, la digitalización de polígonos, la medición de distancias y áreas, así como la integración de capas de información geográfica. Estas capacidades permiten analizar cambios en la superficie terrestre a lo largo del tiempo y reconocer patrones espaciales asociados a distintos fenómenos.

En estudios hidrológicos e hidrogeológicos, Google Earth Pro resulta especialmente útil para la identificación de zonas con acumulación de agua, áreas con vegetación hidrófila y cambios en el uso del suelo, elementos que pueden estar relacionados con procesos de filtración o saturación hídrica.

Además, la disponibilidad de imágenes históricas permite realizar análisis multitemporales, facilitando la evaluación de la evolución espacial de las áreas de estudio. Esta herramienta complementa el uso de los SIG y la fotointerpretación, facilitando la visualización, validación y análisis preliminar de patrones espaciales.

3.1.6 Limitaciones y validación del análisis espacial

Aunque la fotointerpretación, la teledetección y los Sistemas de Información Geográfica constituyen herramientas fundamentales para el análisis espacial, su aplicación presenta ciertas limitaciones que deben ser consideradas para garantizar la confiabilidad de los resultados.

En primer lugar, la fotointerpretación depende de la calidad y resolución espacial, temporal y espectral de las imágenes utilizadas, así como de las condiciones atmosféricas al momento de su captura, como la presencia de nubosidad, sombras o variaciones estacionales, lo que puede afectar la visibilidad y la precisión en la identificación de elementos superficiales. Asimismo, los resultados dependen en gran medida de la experiencia y criterio técnico del analista, lo que introduce un componente subjetivo en la interpretación de las imágenes (Chuvieco, 2010).

Por otra parte, las plataformas de análisis espacial, como los SIG y Google Earth Pro, están condicionadas por la disponibilidad temporal de imágenes, la resolución espacial de los datos y la precisión en la georreferenciación, lo que puede generar incertidumbre en la delimitación exacta de las áreas analizadas. En este sentido, la validación de los resultados mediante trabajo de campo resulta indispensable, ya que permite corroborar la información obtenida a partir del análisis remoto, reducir errores de interpretación y fortalecer la confiabilidad del análisis espacial.

En conjunto, la integración de información de campo con técnicas de fotointerpretación y herramientas de análisis espacial constituye una estrategia metodológica robusta que mejora la precisión en la identificación y delimitación de fenómenos asociados a la dinámica del agua, tanto en superficie como en el subsuelo, aportando un soporte técnico sólido para el desarrollo del presente estudio.

3.2 Hidrogeología

La hidrogeología, también denominada hidrología subterránea, es la rama de la hidrología que estudia el almacenamiento, circulación y distribución del agua en la zona saturada de las formaciones geológicas, considerando sus propiedades físicas y químicas, así como sus interacciones con el medio físico, biológico y la influencia de la actividad humana (Custodio & Llamas, 1983).

Desde una perspectiva más amplia, esta disciplina no solo busca comprender el comportamiento del agua subterránea mediante la observación, análisis y formulación de leyes generales, sino que también constituye una herramienta fundamental para la gestión, control y aprovechamiento de los recursos hídricos, siendo clave dentro del campo de la ingeniería de recursos naturales.

3.2.1 Clasificación de las unidades hidrogeológicas

De acuerdo con Custodio & Llamas (1983), en el estudio de la hidrología subterránea, las formaciones geológicas se clasifican en función de su capacidad para almacenar y transmitir agua, lo que permite distinguirlos de la siguiente manera:

- **Acuífero:** es una formación geológica que permite la circulación del agua a través de sus poros o fracturas, posibilitando su extracción en cantidades económicamente aprovechables. El agua puede almacenarse tanto en los espacios intergranulares como en fisuras o grietas, lo que da lugar a acuíferos por porosidad o por fracturación. Ejemplos comunes incluyen aluviones, areniscas poco cementadas y formaciones calcáreas fracturadas.
- **Acuícludo:** es una formación que, aunque puede contener agua incluso en condiciones de saturación, no permite su transmisión, por lo que no es viable su aprovechamiento. Este comportamiento es típico de materiales finos como arcillas de origen deltaico o estuarino.
- **Acuitardo:** se refiere a una formación que contienen agua y la transmite de manera muy lenta, lo que limita su explotación directa. Sin embargo, esta unidad puede desempeñar un papel importante en la recarga de acuíferos adyacentes bajo ciertas condiciones, actuando como medio de transferencia vertical.

- **Acuífugo:** corresponde a una formación geológica que no contiene agua ni permite su circulación, como ocurre en rocas ígneas o metamórficas compactas sin fracturación significativa ni meteorización.

3.2.2 Tipos de acuífero

Existen diversas formas de clasificar los acuíferos según el criterio que se utilice; sin embargo, generalmente se agrupan en dos categorías principales: de acuerdo con sus características litológicas y en función de la presión hidrostática del agua contenida, es decir, su comportamiento hidrodinámico.

La clasificación de los acuíferos según sus **características litológicas**, de acuerdo con Werner (1996), se basa en el tipo de material geológico que los constituye y en la forma en que el agua se almacena y circula en su interior, distinguiéndose tres tipos.

- Acuíferos de poros:** están constituidos principalmente por sedimentos no consolidados, como gravas y arenas, en los cuales el agua se almacena y se desplaza a través de los espacios intergranulares. Este tipo de acuífero presenta, en general, un comportamiento relativamente homogéneo e isotrópico, lo que ha permitido que sea ampliamente utilizado como base para el desarrollo de estudios hidrogeológicos.
- Acuíferos de grietas:** se desarrollan en rocas consolidadas, tales como areniscas, calizas no carstificadas o rocas ígneas y metamórficas. En estos medios, el agua circula principalmente a través de fracturas de origen tectónico o por procesos de intemperismo, siendo generalmente despreciable la porosidad intergranular. No obstante, en algunos casos pueden presentar una combinación de porosidad primaria y secundaria, lo que influye en su dinámica del flujo.
- Acuíferos kársticos:** se asocian a rocas solubles como calizas, dolomías o yesos, en las cuales la disolución genera conductos, cavidades y sistemas de drenaje subterráneo de dimensiones variables. En estos acuíferos, el flujo del agua se concentra en dichos conductos, lo que da lugar a condiciones altamente heterogéneas y anisotrópicas.

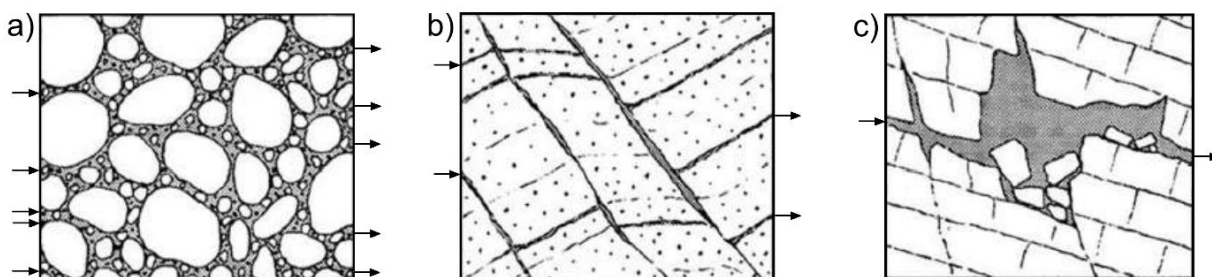


Figura 25. (a) Acuífero de poros, (b) acuífero de grietas, (c) acuífero kárstico (Werner, 1996).

Las propiedades hidráulicas de estos tres tipos de acuíferos difieren significativamente, lo que condiciona su capacidad de almacenamiento, transmisión y respuesta ante la explotación del agua subterránea.

De acuerdo con Custodio & Llamas (1983) y Werner (1996), la clasificación de los acuíferos según su **comportamiento hidrodinámico** se basa en la presión hidrostática del agua y en su respuesta ante procesos de recarga, explotación y flujo. Según sus condiciones de confinamiento, se distinguen los siguientes tipos principales:

1. **Acuífero libre o no confinado**, es aquel en el que el agua se encuentra a presión atmosférica y presenta una superficie libre denominada nivel freático, la cual constituye su límite superior. Este nivel puede variar en el tiempo en función de los procesos de recarga y descarga. En este tipo de acuífero, el agua se encuentra en contacto directo con el aire a través de los poros del suelo, lo que facilita su recarga, pero también lo hace más vulnerable a la contaminación.
2. **Acuífero confinado**, se encuentra limitado por capas de baja permeabilidad que actúan como barreras hidráulicas, lo que provoca que el agua esté sometida a una presión superior a la atmosférica y que la formación geológica se encuentre completamente saturada. Al perforar un pozo que atraviesa la capa confinante, el agua asciende hasta alcanzar el nivel piezométrico, pudiendo incluso generar condiciones artesianas si este nivel supera la superficie del terreno.
3. **Acuífero semiconfinado o con fugas**, representa una condición intermedia, en la que las capas que lo delimitan no son completamente impermeables, sino que permiten una filtración vertical lenta. Esta característica posibilita procesos de intercambio de agua entre acuíferos, dependiendo de las diferencias de potencial hidráulico existentes.

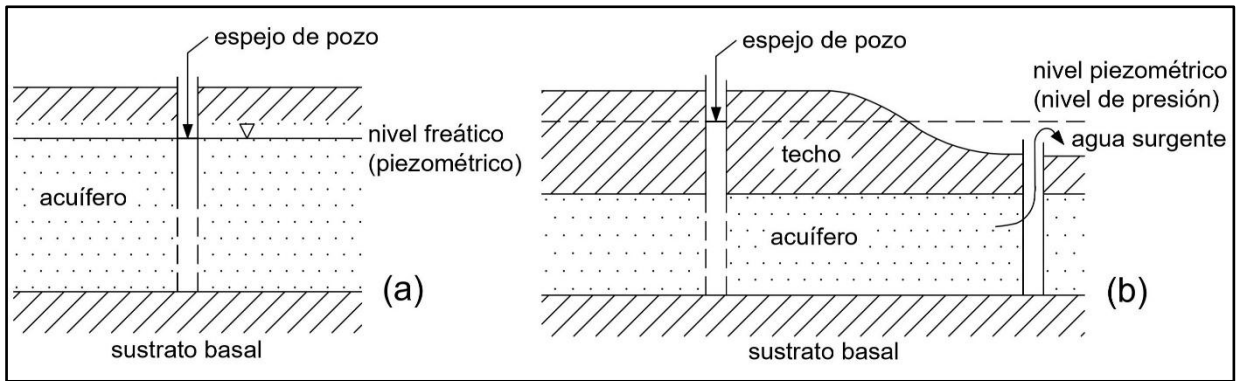


Figura 26. Representación de un acuífero libre (a), y de un acuífero confinado (b), donde se presentan dos condiciones: un pozo en el que el nivel piezométrico se eleva sin alcanzar la superficie, y otro en el que dicho nivel supera el terreno, generando condiciones artesianas (modificado de Werner, 1996).

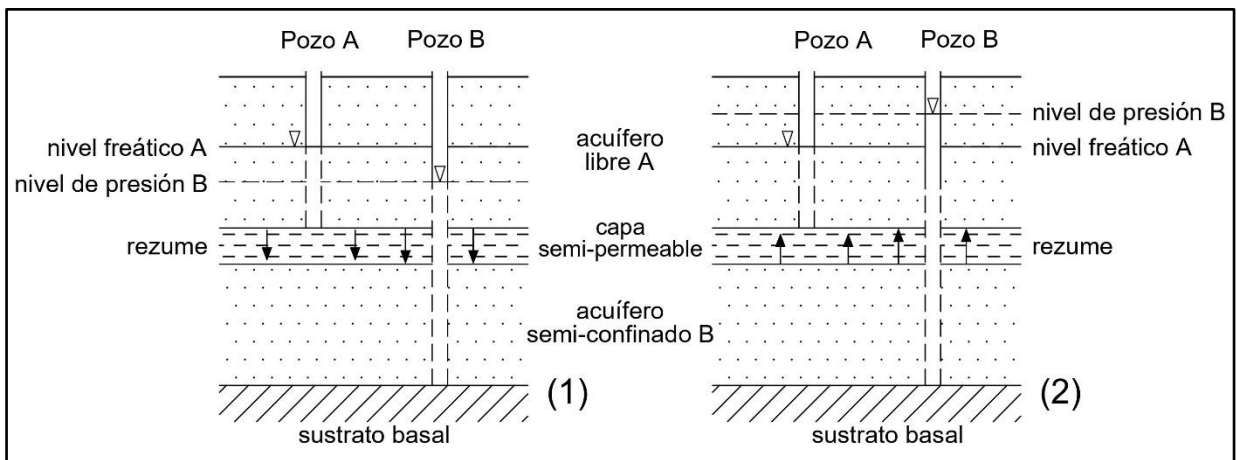


Figura 27. Representación de un acuífero semiconfinado con dos condiciones de flujo. Caso 1: cuando el nivel piezométrico del acuífero libre A es mayor que el del acuífero semiconfinado B, se presenta un flujo descendente (rezume) desde el acuífero superior hacia el inferior a través de la capa semipermeable. Caso 2: cuando el nivel piezométrico del acuífero libre A es menor que el del acuífero semiconfinado B, se presenta un flujo ascendente (rezume) desde el acuífero inferior hacia el superior a través de la capa semipermeable (modificado de Werner, 1996).

Adicionalmente, pueden presentarse condiciones particulares como los **acuíferos artesianos** (Figura 26), en los cuales el agua asciende naturalmente debido a la presión interna del sistema, o los **acuíferos colgados** (Figura 28, acuífero A), que corresponden a acumulaciones locales de agua situadas por encima del nivel freático regional, generalmente asociadas a discontinuidades en materiales de baja permeabilidad (Werner, 1996).

Asimismo, en algunos contextos geológicos se desarrollan sistemas de **acuíferos de estratos múltiples** (Figura 28), también conocidos de manera descriptiva como acuíferos de pisos, constituidos por varias unidades acuíferas separadas por capas de baja permeabilidad y de espesor pequeño, lo que genera un comportamiento hidráulico complejo, caracterizado por una marcada anisotropía vertical (Werner, 1996).

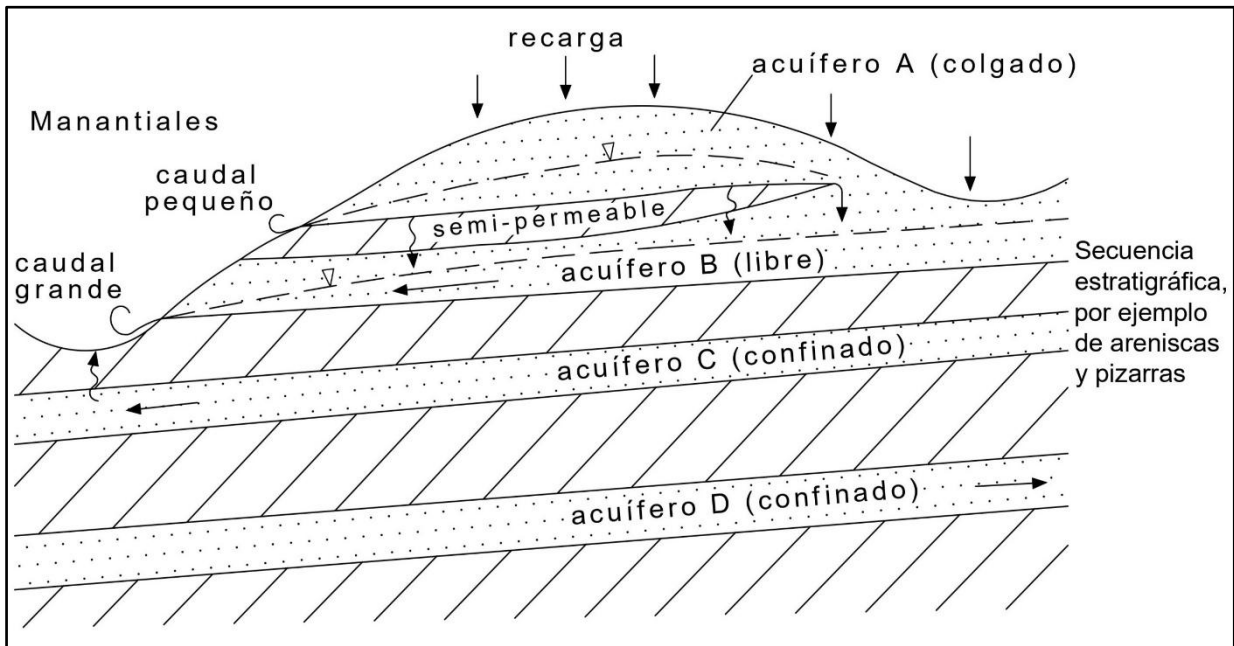


Figura 28. Representación de un acuífero de estratos múltiples, compuesto por un acuífero colgado (A), un acuífero libre (B) y acuíferos confinados (C y D), separados por capas de baja permeabilidad. El esquema muestra procesos de recarga, flujo subterráneo y descarga, así como la existencia de distintos niveles piezométricos asociados a cada unidad hidrogeológica (modificado de Werner, 1996).

3.2.3 Piezometría

La piezometría es una herramienta fundamental de la hidrogeología que permite analizar el comportamiento del agua subterránea a partir de la medición del nivel piezométrico en pozos, norias o piezómetros. Dicho nivel representa la altura a la que asciende el agua en una perforación que se encuentra en equilibrio hidráulico con el acuífero, y constituye una expresión directa de la carga hidráulica del sistema.

En los acuíferos libres, el nivel piezométrico coincide con la superficie freática y aflora en los pozos como el espejo de agua. En contraste, en los acuíferos confinados, el nivel observado corresponde al nivel de presión del acuífero, el cual puede ubicarse por encima del techo de este (Figura 26). En ambos casos, el nivel medido en campo se

denomina nivel piezométrico y es el parámetro básico para la interpretación del flujo subterráneo (Werner, 1996).

La determinación de los niveles piezométricos se realiza mediante perforaciones que permitan el acceso directo al acuífero, tales como pozos, norias o piezómetros. Estos últimos son dispositivos diseñados específicamente para la medición del nivel del agua, generalmente de pequeño diámetro. Debido a los costos de construcción, es común aprovechar estructuras existentes, siempre que sean representativas del comportamiento del acuífero. También, pueden considerarse otras manifestaciones naturales como manantiales, cuerpos de agua superficiales o zonas saturadas, que bajo ciertas condiciones hidrogeológicas permiten inferir el nivel piezométrico.

La medición del nivel del agua en pozos y piezómetros se realiza comúnmente mediante dispositivos manuales, como cintas graduadas con sensores de contacto, alcanzando precisiones del orden de centímetros. Para interpretar correctamente estos valores, es necesario referir las mediciones a una cota conocida, generalmente respecto al nivel medio del mar, lo cual requiere de una adecuada nivelación topográfica. La precisión de estas mediciones dependerá del gradiente hidráulico del sistema, siendo necesario un mayor grado de exactitud en acuíferos con gradientes muy bajos (Custodio & Llamas, 1983).

El nivel piezométrico (**h**) se expresa como una elevación referida a un plano de referencia, generalmente al nivel medio del mar, y se obtiene a partir de la diferencia entre la elevación del punto de medición (**h_0**) y la profundidad del nivel del agua en el pozo (**s**) (Figura 29). Esta relación permite estandarizar las mediciones y compararlas espacialmente dentro de un mismo sistema acuífero (Werner, 1996).

La representación espacial del nivel piezométrico se realiza mediante cartas piezométricas, las cuales muestran la configuración del plano piezométrico a través de curvas de igual carga hidráulica, conocidas como isopiezas. Estas cartas proporcionan información clave sobre el comportamiento del agua subterránea, ya que permiten identificar la dirección preferente del flujo, los gradientes hidráulicos, así como posibles zonas de recarga y descarga.

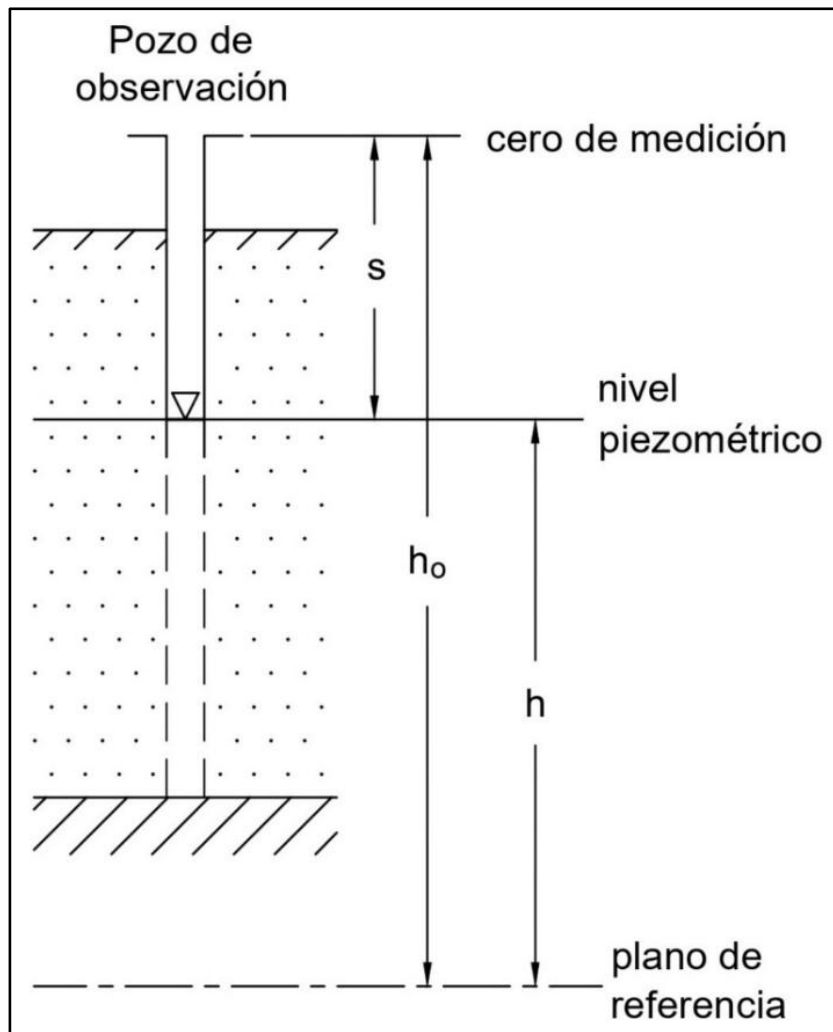


Figura 29. Medición del nivel piezométrico en un pozo de observación (modificado de Werner, 1996).

La elaboración de cartas piezométricas se realiza a partir del trazado de isopiezas con base en datos puntuales, mediante procedimientos análogos a los utilizados en topografía. La equidistancia entre estas curvas depende de factores como la escala del plano, la distribución de los puntos de medición, la pendiente de la superficie piezométrica y la precisión de los datos disponibles.

De acuerdo con Werner (1996), la construcción de una carta piezométrica se basa en la interpolación de los valores de nivel piezométrico entre los distintos puntos de medición. Una de las bases conceptuales más utilizadas para esta interpolación es el denominado **triángulo hidrológico**, el cual permite estimar la variación del nivel piezométrico entre tres puntos cercanos, asumiendo un comportamiento aproximadamente lineal del plano piezométrico.

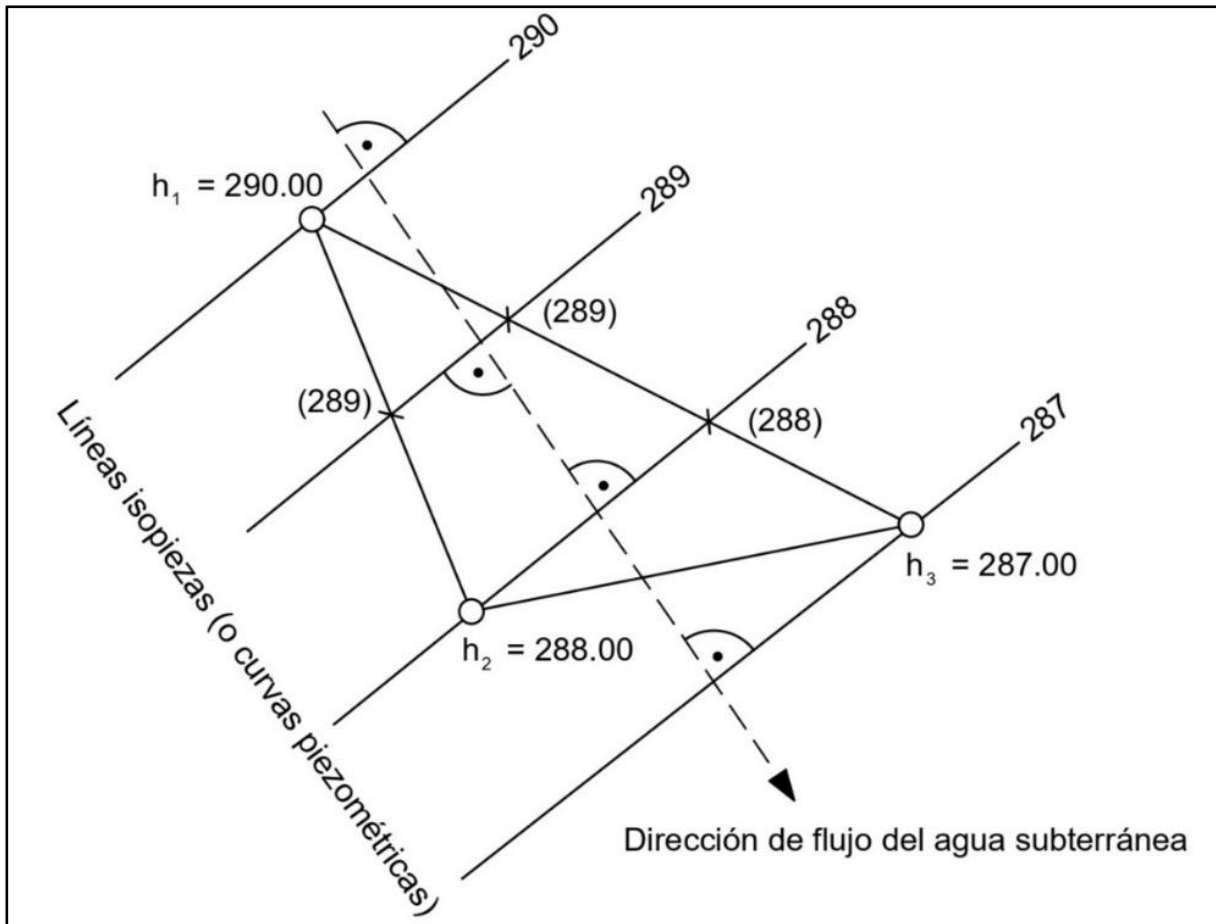


Figura 30. Triángulo hidrológico (modificado de Werner, 1996).

En la Figura 30 se presenta el esquema del triángulo hidrológico, en donde todas las alturas se expresan en metros sobre el nivel del mar (msnm). Los vértices del triángulo corresponden a tres pozos previamente nivelados, en los cuales se ha medido el nivel piezométrico. A partir de las diferencias de altura entre h_1 , h_2 y h_3 , los lados del triángulo se dividen proporcionalmente mediante la regla de tres, lo que permite realizar el trazo de las líneas isopiezas.

A partir de la unión de múltiples triángulos, se genera una superficie continua definida por líneas isopiezas, la cual posteriormente se suaviza (curvas piezométricas) para representar de manera más realista el comportamiento del acuífero (Figura 31).

El trazado adecuado de las curvas piezométricas también debe considerar las condiciones geológicas e hidráulicas del sistema, tales como cambios en la geometría del acuífero, presencia de límites impermeables, cuerpos de agua superficiales, zonas

de recarga y descarga, así como estructuras geológicas relevantes. En este contexto, las líneas de corriente pueden emplearse como apoyo en la interpretación, considerando que son perpendiculares a las isopiezas bajo condiciones de isotropía horizontal (Custodio y Llamas, 1983).

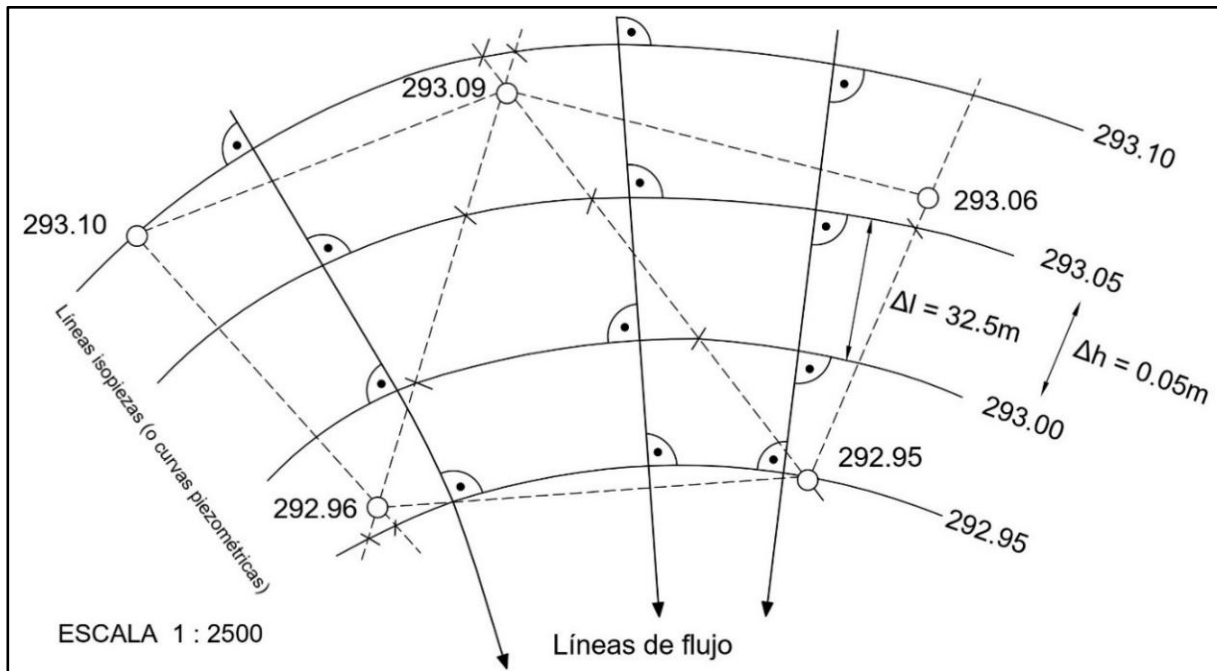


Figura 31. Parte de un plano piezométrico, construido a partir de varios triángulos hidrológicos, en donde las líneas de flujo tienen que ser perpendiculares a las isopiezas (modificado de Werner, 1996).

Las direcciones de flujo del agua subterránea se determinan a partir del gradiente piezométrico (i), el cual se define como la relación entre la diferencia de carga hidráulica (Δl) y la distancia horizontal (Δh) entre dos puntos (Figura 32). El flujo subterráneo ocurre siempre en dirección perpendicular a las isopiezas, desde zonas de mayor carga hidráulica hacia zonas de menor carga, siguiendo el gradiente más pronunciado.

$$i = \frac{\Delta h}{\Delta l} \text{ [sin dim.]}$$

Donde:

Δh [m] = distancia vertical

Δl [m] = distancia horizontal entre dos puntos del nivel

Figura 32. Fórmula para obtener el gradiente piezométrico (i) (modificado de Werner, 1996).

Dado que los niveles piezométricos pueden presentar variaciones temporales, y para asegurar la confiabilidad de la interpretación, las cartas piezométricas deben indicar claramente, los puntos de medición, los valores de nivel piezométrico registrados, la fecha o periodo de medición, así como la escala de representación. Este aspecto es particularmente relevante cuando se trabaja con información histórica o no simultánea, ya que condiciona el alcance y la interpretación de los resultados.

Adicionalmente, es fundamental verificar que los datos utilizados correspondan a un mismo acuífero y, en caso de existir una notable estratificación, a un mismo subacuífero. Para ello, se debe tener especial cuidado en la selección de los puntos de observación, evitando la mezcla de mediciones provenientes de acuíferos con distinto comportamiento piezométrico.

3.2.4 Tipos de superficies piezométricas

Las superficies piezométricas pueden presentar distintas configuraciones en función de la forma y disposición de las isopiezas, así como de la relación entre estas y las líneas de corriente. Estas clasificaciones, de carácter morfológico, permiten interpretar el comportamiento del flujo subterráneo en diferentes contextos hidrogeológicos.

Entre los tipos más comunes se encuentran:

- **Superficie cilíndrica:** caracterizada por isopiezas rectas y paralelas, lo que indica un flujo uniforme en una dirección definida.
- **Superficie radial:** presenta isopiezas curvas y líneas de corriente convergentes o divergentes, asociadas generalmente a zonas de recarga o descarga.
- **Superficie plana:** definida por una separación constante entre isopiezas, lo que indica un gradiente hidráulico uniforme.
- **Superficie parabólica:** la separación entre isopiezas disminuye en la dirección del flujo, lo que sugiere una aceleración de este.
- **Superficie hiperbólica:** la separación entre isopiezas aumenta en la dirección del flujo, indicando una disminución del gradiente hidráulico.
- **Superficie elíptica:** presenta variaciones en la separación de las isopiezas hacia ambos lados, reflejando condiciones más complejas del flujo.

En la práctica, las superficies piezométricas reales suelen presentar configuraciones mixtas o complejas, como resultado de la heterogeneidad del medio y de las condiciones hidráulicas del sistema (Custodio & Llamas, 1983), lo cual se ilustra con algunos ejemplos representativos en la Figura 33.

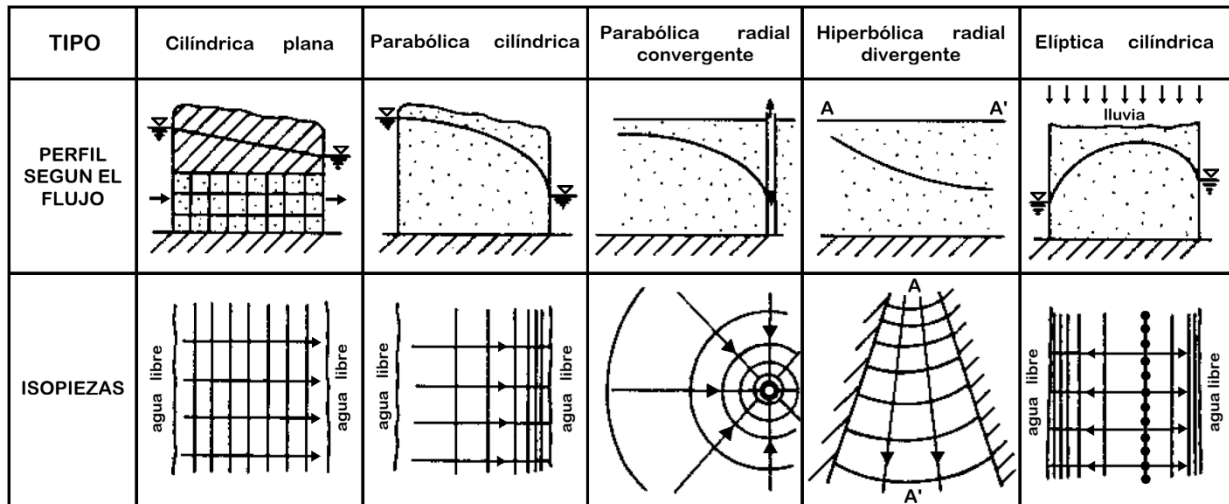


Figura 33. Ejemplos representativos de superficies piezométricas y sus patrones de flujo, con diversas combinaciones bajo distintas condiciones hidráulicas (modificado de Custodio & Llamas, 1983).

3.2.5 Interpretación cualitativa de superficies piezométricas

De acuerdo con Custodio & Llamas (1983), El análisis de las superficies piezométricas constituye una herramienta fundamental para comprender el comportamiento del flujo subterráneo, ya que permite identificar patrones de movimiento, zonas de recarga y descarga, así como inferir características hidráulicas del acuífero. Esta interpretación puede realizarse de manera cualitativa, a partir de la forma y disposición de las isopiezas, o cuantitativa mediante métodos analíticos o numéricos.

Es importante considerar que, especialmente en zonas con escasa densidad de datos, las superficies piezométricas pueden incorporar cierto grado de interpretación subjetiva. Por ello, debe evitarse deducir conclusiones que estén implícitas en los supuestos utilizados durante su elaboración. Para mejorar la interpretación, es recomendable complementar las cartas piezométricas con líneas de corriente, las cuales son perpendiculares a las isopiezas bajo condiciones de isotropía horizontal, permitiendo una mejor visualización de las trayectorias del flujo.

La superficie piezométrica representa una condición instantánea del sistema, por lo que puede variar en el tiempo en función de los procesos de recarga, descarga y explotación. No obstante, estas variaciones suelen afectar en mayor medida el análisis cuantitativo que la interpretación cualitativa general del flujo.

Desde el punto de vista hidrogeológico, la relación entre la superficie piezométrica y la topografía permite identificar zonas de descarga, como manantiales o aportes a ríos, cuando ambas superficies se intersectan. Por otra parte, la forma de la superficie freática en acuíferos libres está influenciada por la recarga y la transmisividad del medio, siendo más irregular en zonas de baja permeabilidad y mayor recarga, y más suave en materiales altamente permeables.

La disposición de las isopiezas también permite interpretar procesos hidráulicos específicos. Por ejemplo, cuando las líneas de flujo convergen hacia una zona, generalmente indican áreas de descarga, como ríos o zonas de bombeo, mientras que su divergencia suele asociarse a zonas de recarga (Figura 34). La presencia de curvas cerradas puede señalar recargas o descargas localizadas, aunque su ausencia no implica necesariamente la inexistencia de estos procesos (Figura 36).

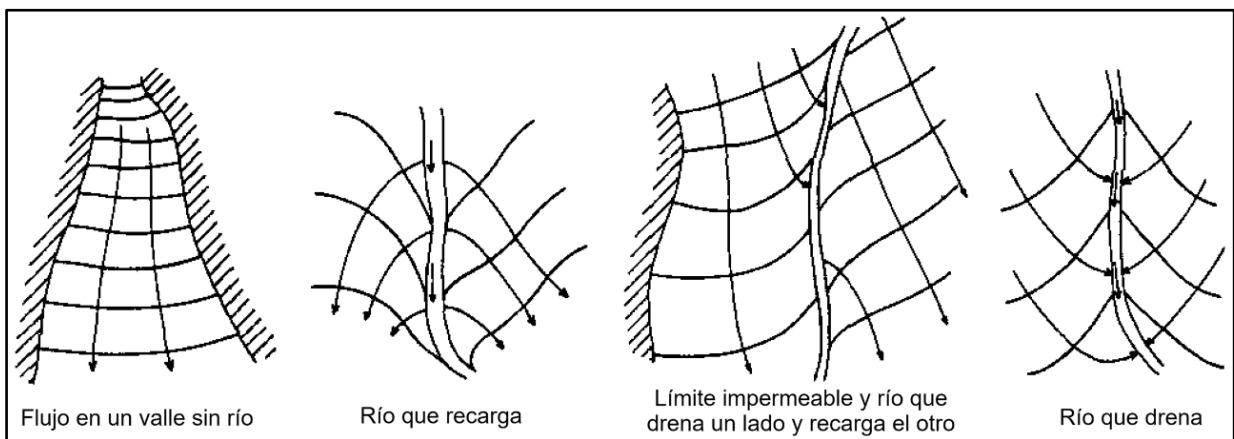


Figura 34. Configuración de isopiezas y líneas de flujo que muestran casos de convergencia hacia zonas de descarga y divergencia desde zonas de recarga (modificado de Custodio & Llamas, 1983).

Asimismo, la separación entre isopiezas proporciona información sobre las condiciones del acuífero. Una disminución del espaciamiento entre isopiezas en la dirección del flujo puede indicar una reducción de la transmisividad (por menor permeabilidad, espesor o ambos), mientras que un aumento indica una mayor transmisividad (Figura 35).

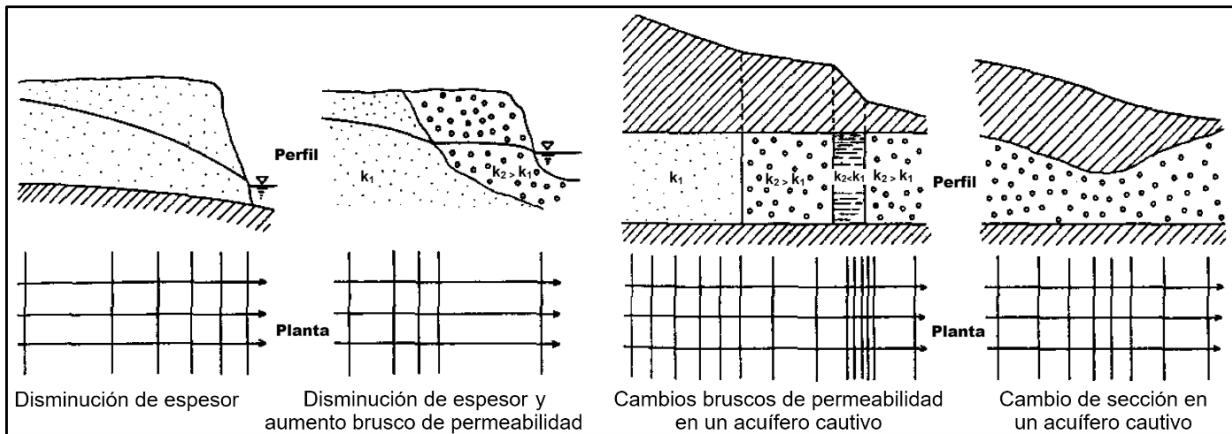


Figura 35. Efectos de variaciones en el espesor y la permeabilidad del acuífero sobre la separación de las isopiezas en un sistema de líneas de flujo paralelas (modificado de Custodio & Llamas, 1983).

En condiciones más complejas, como flujos convergentes o divergentes, estos patrones pueden estar influenciados simultáneamente por variaciones en la transmisividad y por procesos de recarga o descarga. Aunque, en términos generales, la convergencia se asocia con la descarga hacia ríos o con zonas de bombeo o evapotranspiración, mientras que la divergencia responde a procesos de recarga localizada o distribuida.

Las superficies piezométricas también permiten identificar efectos asociados a actividades antrópicas, como la extracción de agua (bombeo), que puede generar distorsiones en las isopiezas, así como la influencia de cuerpos de agua superficiales, donde pueden presentarse anomalías temporales debido a los efectos dinámicos presentados por las variaciones rápidas en sus niveles (Figura 36).

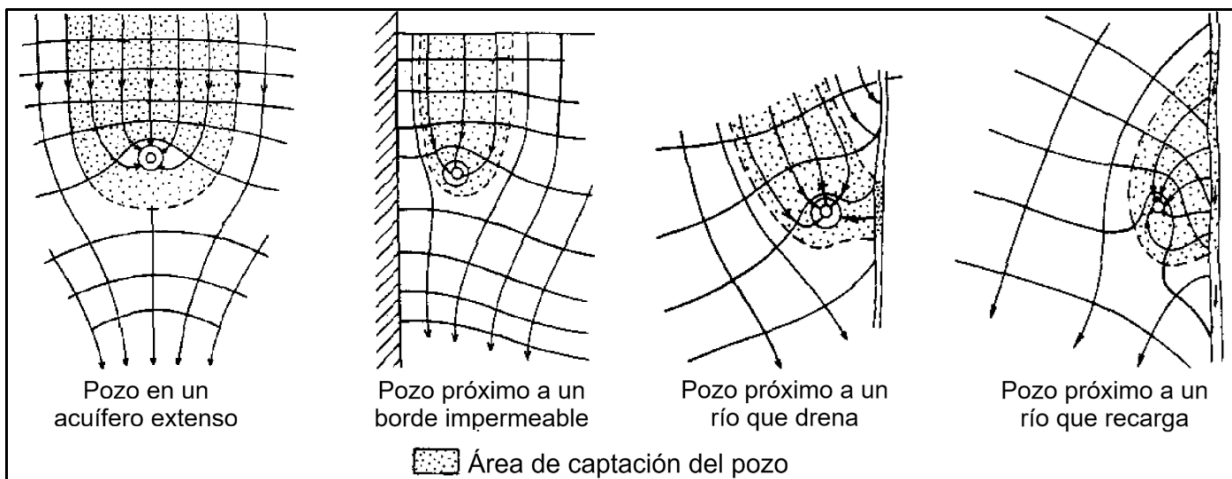


Figura 36. Distorsión de las curvas piezométricas en acuíferos con flujo natural, generada por el bombeo en pozos (modificado de Custodio & Llamas, 1983).

En acuíferos confinados o semiconfinados pueden presentarse divisorias o vaguadas piezométricas que no están directamente asociadas a zonas de recarga o extracción. Estas estructuras pueden interpretarse como zonas donde existe una discontinuidad en el confinamiento, que facilita la entrada o salida de agua, o bien como líneas de caudal nulo, a partir de las cuales el flujo subterráneo se divide en distintas direcciones. La identificación de estas divisorias es relevante, ya que puede aportar información sobre el comportamiento hidráulico del sistema e incluso ayudar a diferenciar entre condiciones de confinamiento y semiconfinamiento (Figura 37).

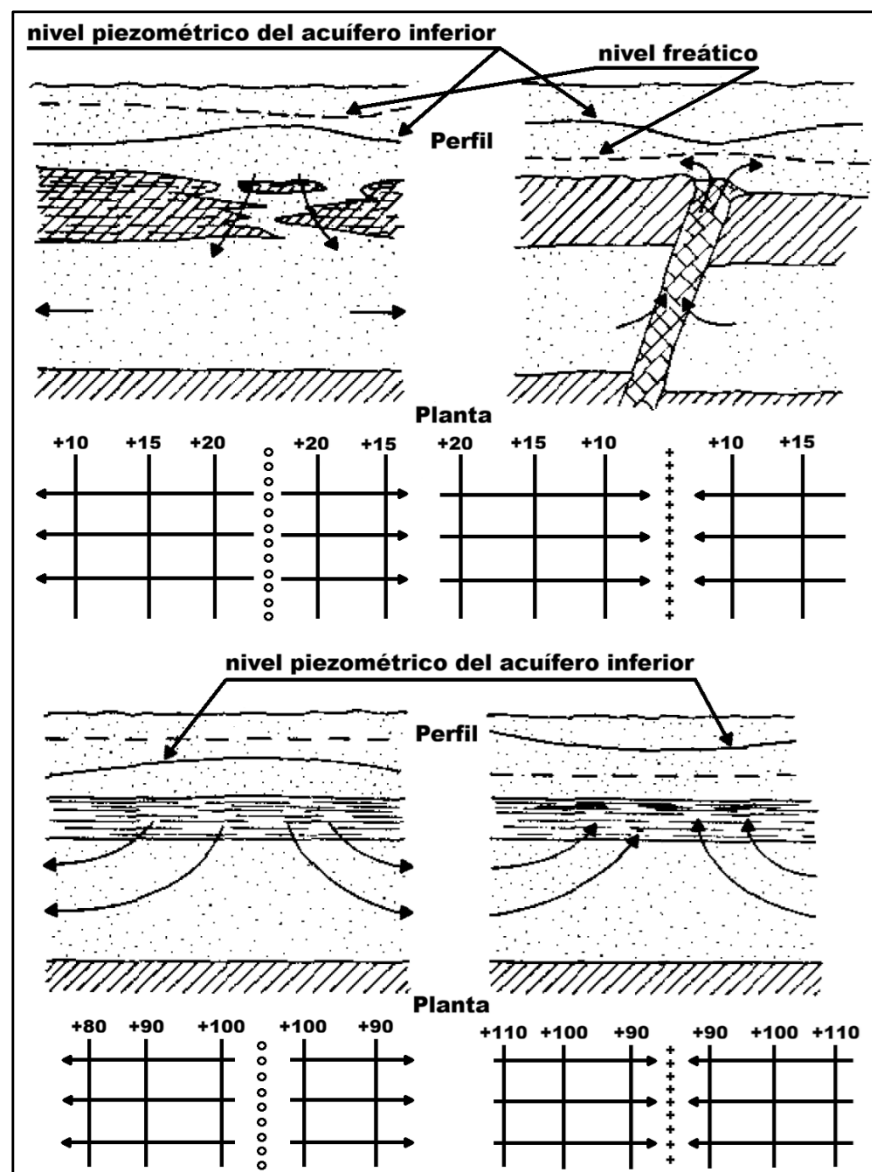


Figura 37. Representación de divisorias y vaguadas piezométricas en acuíferos confinados y semiconfinados (modificado de Custodio & Llamas, 1983).

Finalmente, la interpretación de estas superficies piezométricas puede proporcionar indicios sobre la estructura geológica del subsuelo, como la presencia de fallas, zonas de mayor o menor permeabilidad, o sistemas de acuíferos múltiples. No obstante, para lograr una interpretación confiable, es indispensable contar con una adecuada densidad de datos, así como con información geológica que respalde el análisis (Figura 38).

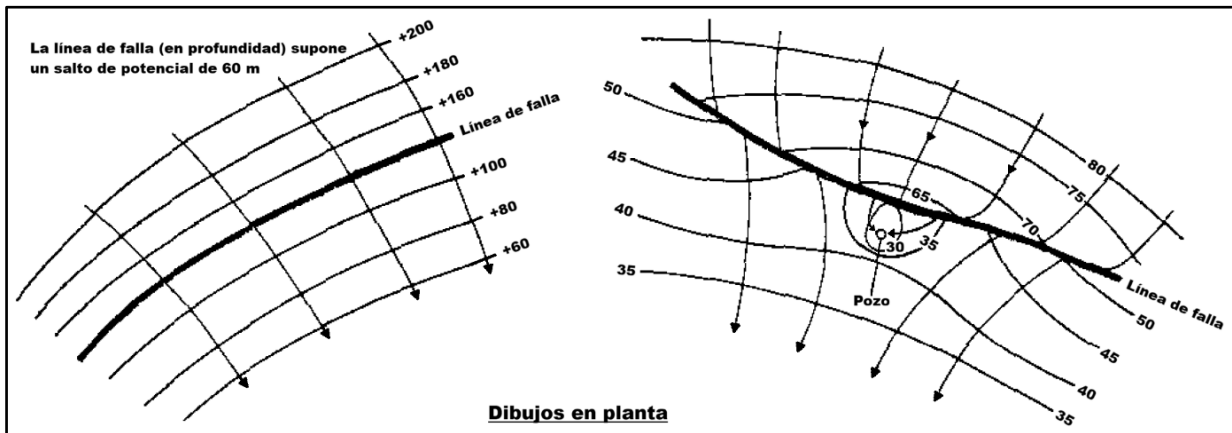


Figura 38. Efecto de fallas de baja permeabilidad sobre la configuración de las curvas piezométricas y el flujo subterráneo (modificado de Custodio & Llamas, 1983).

En conjunto, los conceptos abordados en este subcapítulo 3.2 proporcionan la base para comprender el comportamiento del agua subterránea como un sistema dinámico condicionado por la naturaleza de las formaciones geológicas, sus propiedades hidráulicas y las relaciones de flujo que se establecen entre ellas. La identificación de los distintos tipos de unidades hidrogeológicas, así como el análisis de los niveles piezométricos y su representación espacial, permiten interpretar de manera integral los procesos de almacenamiento, circulación y transmisión del agua en el subsuelo. Este marco conceptual resulta fundamental para sustentar los análisis posteriores, orientados a la caracterización del sistema acuífero de estudio y a la evaluación de su funcionamiento bajo condiciones naturales y de intervención.

3.3 Hidrología

La hidrología es la rama de las ciencias de la Tierra que estudia la ocurrencia, distribución, circulación y comportamiento del agua sobre y debajo de la superficie terrestre, así como los procesos físicos que regulan su movimiento dentro del ciclo hidrológico (Figura 39). En el ámbito de la ingeniería hidráulica, su aplicación permite

comprender la interacción entre los diferentes componentes que intervienen en el almacenamiento, transporte y aprovechamiento del recurso hídrico, proporcionando las bases para el análisis y operación de obras como presas, embalses y sistemas de abastecimiento (Chow et al., 1994).

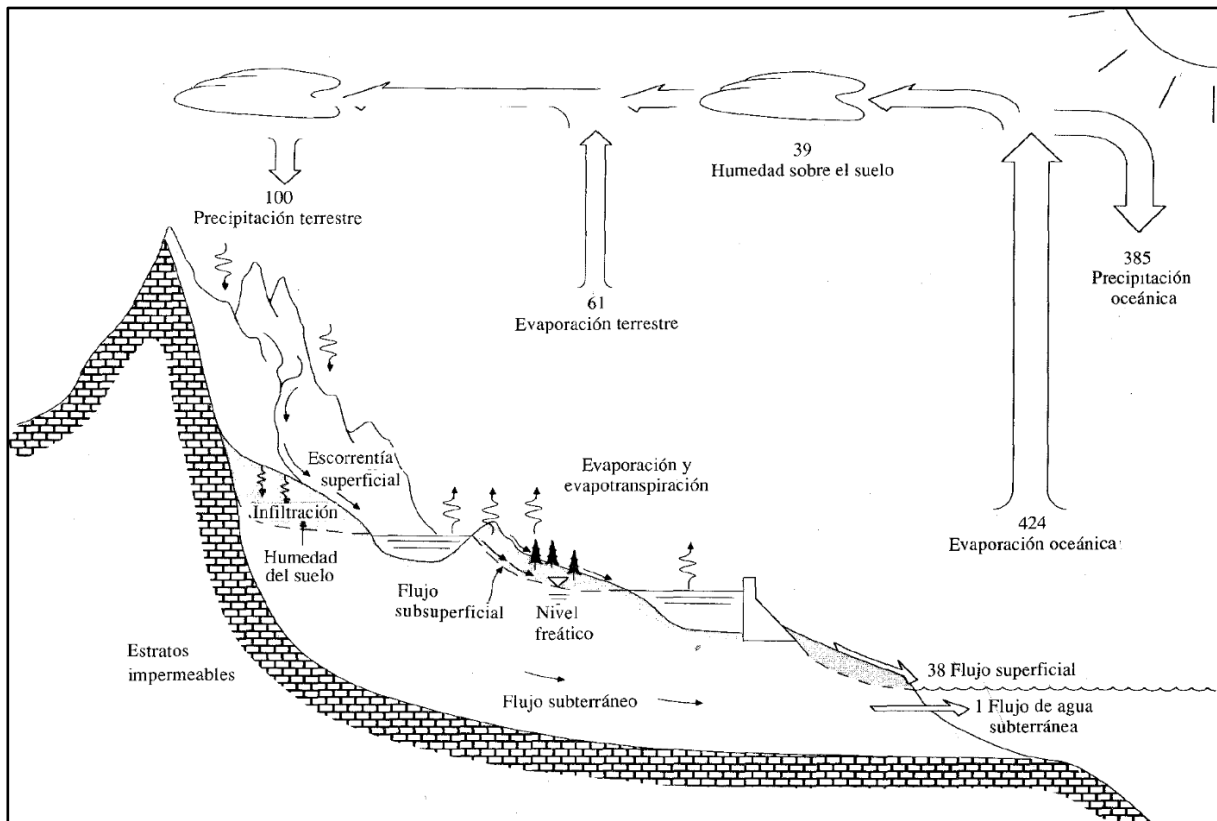


Figura 39. Representación general del ciclo hidrológico y sus principales procesos (Chow et al., 1994).

En el caso de los embalses, el comportamiento del agua está determinado por la interacción entre diversos procesos hidrológicos que regulan las entradas, salidas y variaciones del volumen almacenado a lo largo del tiempo. El análisis conjunto de estos procesos permite comprender el funcionamiento hidráulico del sistema, evaluar la disponibilidad del recurso y establecer relaciones entre las condiciones hidrológicas y la respuesta del embalse ante diferentes escenarios de operación.

3.3.1 Balance hídrico en embalses

El balance hídrico constituye una de las herramientas fundamentales de la hidrología para analizar el comportamiento de un sistema mediante la cuantificación de los volúmenes de agua que ingresan, permanecen almacenados y abandonan dicho

sistema durante un periodo determinado. En el caso de los embalses, este procedimiento permite evaluar la relación entre las entradas, las salidas y la variación del almacenamiento, proporcionando una base para conocer la disponibilidad del recurso hídrico, interpretar la respuesta del sistema ante diferentes condiciones hidrológicas y apoyar su gestión y operación (Linsley et al., 1988).

El fundamento físico del balance hídrico se encuentra en el principio de conservación de la masa, el cual establece que la masa no puede crearse ni destruirse, sino únicamente transformarse o transferirse entre los diferentes componentes de un sistema. Aplicado a la hidrología, este principio establece que cualquier variación en el volumen almacenado dentro de un sistema debe ser consecuencia de la diferencia existente entre el agua que ingresa y la que abandona dicho sistema. Chow et al. (1994) desarrollan este principio mediante la *ecuación de continuidad integral* para un flujo de volumen, considerada la base para el análisis hidrológico de cuencas, ríos y embalses.

En su forma general, la ecuación de continuidad integral para el flujo no permanente de densidad constante puede expresarse como:

$$\frac{dS}{dt} = I(t) - Q(t)$$

Donde:

- $\frac{dS}{dt}$ = Variación del almacenamiento con respecto al tiempo.
- $I(t)$ = Flujo de entrada al sistema.
- $Q(t)$ = Flujo de salida al sistema.
- S = Almacenamiento del sistema.

Esta expresión establece que la variación del almacenamiento durante un intervalo de tiempo determinado está dada por la diferencia entre los flujos de entrada y de salida. Cuando las entradas son mayores que las salidas, el volumen almacenado aumenta; por el contrario, si las salidas superan a las entradas, el almacenamiento disminuye. En condiciones de equilibrio, ambos flujos se igualan, por lo que el volumen almacenado permanece constante.

En aplicaciones hidrológicas, la ecuación de continuidad constituye la base para el desarrollo de balances hídricos, cuya formulación puede adaptarse de acuerdo con las características del sistema analizado y con la disponibilidad de información. En consecuencia, las componentes que integran un balance hídrico dependen de los procesos hidrológicos y operativos que resulten representativos para cada caso de estudio. Bajo este enfoque, el análisis de un embalse consiste en identificar las principales entradas y salidas de agua, cuantificarlas durante un periodo determinado y evaluar su efecto conjunto sobre la variación del almacenamiento.

3.3.2 Componentes del balance hídrico

Una vez establecido el principio general del balance hídrico, resulta necesario identificar las componentes hidrológicas que representan las entradas, las salidas y la variación del almacenamiento dentro del sistema. La selección de estas componentes depende de las características del sistema analizado, de los procesos hidrológicos que intervienen en él y de la disponibilidad de información para su cuantificación. En conjunto, estas variables describen los procesos que modifican el volumen de agua almacenado durante un periodo determinado y permiten representar el comportamiento hidrológico del sistema.

De manera general, las variables que intervienen en un balance hídrico se agrupan en componentes de entrada y de salida, cuya interacción determina la variación del almacenamiento. Las entradas corresponden a los volúmenes de agua que ingresan al sistema y contribuyen a incrementar las reservas disponibles, mientras que las salidas representan los volúmenes que abandonan el sistema debido a procesos naturales o a condiciones de operación. Como resultado, la variación del almacenamiento refleja el efecto combinado de ambos grupos de componentes durante el periodo de análisis.

Las componentes consideradas en un balance hídrico pueden variar de acuerdo con el tipo de sistema evaluado. En el caso de los embalses, las entradas suelen estar representadas principalmente por la precipitación directa sobre el vaso de almacenamiento y el escurrimiento superficial proveniente de la cuenca tributaria. Por su parte, las salidas pueden incluir procesos naturales, como la evaporación y las

filtraciones, así como los volúmenes asociados al aprovechamiento y la transferencia del agua almacenada.

La identificación de las componentes que intervienen en el balance hídrico permite establecer la estructura del modelo de análisis y determinar los procesos que controlan la disponibilidad de agua en el embalse. Su cuantificación hace posible evaluar la contribución de cada componente al comportamiento hidrológico del sistema y estimar la variación del almacenamiento durante el periodo de estudio.

3.3.3 Precipitación

La precipitación constituye uno de los principales procesos del ciclo hidrológico y corresponde a la caída de agua desde la atmósfera hacia la superficie terrestre en forma líquida o sólida, como lluvia, llovizna, nieve o granizo. En hidrología, representa el mecanismo mediante el cual el agua retorna a la superficie después de los procesos de evaporación y condensación, constituyendo la principal fuente de aporte para cuencas, ríos, lagos y embalses (Chow et al., 1994).

La precipitación se expresa generalmente como una lámina de agua acumulada sobre una superficie horizontal durante un intervalo de tiempo determinado y se mide comúnmente en milímetros (mm). Su registro se realiza mediante pluviómetros y estaciones meteorológicas, cuyos datos permiten evaluar la distribución espacial y temporal de este fenómeno y constituyen la base para diversos análisis hidrológicos (Linsley et al., 1988).

Desde la perspectiva del balance hídrico, la precipitación representa una componente de entrada cuando ocurre directamente sobre la superficie del embalse, ya que contribuye al incremento del volumen almacenado. A diferencia del escurrimiento superficial, este aporte es independiente de los volúmenes provenientes de la cuenca de drenaje y depende de la magnitud de la precipitación registrada y del área superficial del vaso de almacenamiento durante el periodo de análisis.

La contribución de la precipitación al balance hídrico está directamente relacionada con el área superficial del embalse, debido a que el volumen aportado corresponde al producto de la lámina de precipitación y la superficie ocupada por el agua. En

consecuencia, las variaciones del nivel de almacenamiento modifican el área expuesta del embalse y, por tanto, el volumen de agua incorporado mediante este proceso.

Aunque en muchos embalses la precipitación directa representa una aportación menor en comparación con el escurrimiento superficial, su incorporación al balance hídrico resulta necesaria para representar de manera más completa las entradas de agua al embalse y mejorar la estimación de la variación del almacenamiento.

3.3.4 Escurrimiento superficial

El escurrimiento superficial constituye uno de los principales procesos del ciclo hidrológico y corresponde al flujo de agua que circula sobre la superficie del terreno como consecuencia de la precipitación cuando ésta supera la capacidad de infiltración del suelo o cuando el terreno alcanza condiciones de saturación. Este proceso representa el mecanismo mediante el cual una parte del agua precipitada es conducida hacia cauces naturales, ríos, lagos y embalses, constituyendo la principal fuente de abastecimiento superficial de estos sistemas (Chow et al., 1994).

El escurrimiento superficial se expresa generalmente como un caudal o volumen de agua asociado a un periodo determinado. Su cuantificación se realiza mediante estaciones hidrométricas instaladas sobre los cauces, las cuales registran de forma continua el comportamiento de los flujos y permiten evaluar la respuesta hidrológica de una cuenca ante diferentes condiciones de precipitación. Los registros obtenidos en estas estaciones constituyen una de las principales fuentes de información para la evaluación hidrológica de cuencas y la estimación de los volúmenes de entrada en embalses (Linsley et al., 1988).

Desde la perspectiva del balance hídrico, el escurrimiento superficial representa una componente de entrada al embalse, ya que corresponde al volumen de agua aportado por la cuenca tributaria hacia el vaso de almacenamiento. A diferencia de la precipitación directa sobre el embalse, esta componente integra la respuesta hidrológica de toda la cuenca de drenaje, por lo que su magnitud depende de factores como la intensidad y distribución de la lluvia, las características fisiográficas de la cuenca, el tipo de suelo, la cobertura vegetal y las condiciones de humedad

antecedente, los cuales determinan la proporción de agua que finalmente alcanza el embalse.

La contribución del escurrimiento superficial al balance hídrico está determinada por el volumen de agua que efectivamente ingresa al embalse durante el periodo de análisis. Debido a que este proceso integra el comportamiento hidrológico de la cuenca, presenta variaciones temporales y estacionales asociadas a las condiciones de precipitación y estiaje, por lo que suele representar la principal fuente de aportación de agua y condicionar directamente las variaciones del almacenamiento y la disponibilidad del recurso hídrico.

En consecuencia, la adecuada cuantificación del escurrimiento superficial resulta indispensable para representar correctamente las entradas del balance hídrico y evaluar el comportamiento volumétrico del embalse. Debido a que, en la mayoría de los casos, constituye la componente de mayor magnitud dentro del balance, su estimación influye de manera determinante en la representación del comportamiento hidrológico del sistema y en la disponibilidad de agua para los diferentes usos del embalse.

3.3.5 Evaporación en embalses

La evaporación constituye uno de los principales procesos del ciclo hidrológico y corresponde al cambio de estado del agua de fase líquida a vapor debido al aporte de energía, principalmente por efecto de la radiación solar y las condiciones atmosféricas. Este proceso ocurre de manera continua sobre cuerpos de agua, suelos y vegetación, formando parte del intercambio permanente de agua entre la superficie terrestre y la atmósfera (Chow et al., 1994).

La evaporación se expresa generalmente como una lámina de agua evaporada durante un intervalo de tiempo determinado y se mide comúnmente en milímetros (mm). Su estimación puede realizarse mediante diferentes procedimientos, siendo los tanques de evaporación uno de los métodos más utilizados, ya que permiten registrar el comportamiento temporal de este proceso bajo las condiciones climáticas de una región (Linsley et al., 1988).

Desde la perspectiva del balance hídrico, la evaporación representa una componente de salida, ya que ocasiona pérdidas directas de agua desde la superficie libre del embalse hacia la atmósfera. A diferencia de las extracciones destinadas a diferentes usos del agua, la evaporación constituye un proceso natural continuo cuya magnitud depende principalmente de factores como la radiación solar, la temperatura del aire, la humedad relativa, la velocidad del viento y el área superficial expuesta del embalse. Como consecuencia de la variabilidad de estas condiciones, la evaporación presenta cambios temporales y estacionales que influyen directamente en las pérdidas de agua del sistema.

La contribución de la evaporación al balance hídrico está directamente relacionada con el área superficial del embalse, debido a que el volumen evaporado corresponde al producto de la lámina de evaporación y la superficie ocupada por el agua. En consecuencia, las variaciones del nivel de almacenamiento modifican el área expuesta del embalse y, por tanto, el volumen de agua perdido mediante este proceso.

En la mayoría de los embalses, la evaporación constituye una de las principales pérdidas naturales de agua, particularmente en regiones donde predominan altas temperaturas y prolongados periodos de estiaje. Por ello, su incorporación al balance hídrico resulta indispensable para representar adecuadamente las salidas del sistema y mejorar la estimación de la variación del almacenamiento.

3.3.6 Extracciones y transferencias de agua en embalses

En los embalses, además de las pérdidas naturales de agua, existen salidas asociadas a la operación del sistema, las cuales corresponden principalmente a las extracciones destinadas a satisfacer diferentes demandas de uso y a las transferencias de agua hacia otros sistemas hidráulicos. Estas componentes representan volúmenes controlados cuya magnitud depende de las condiciones de operación y de los objetivos para los cuales fue construido el embalse (Linsley et al., 1988).

Desde el punto de vista del balance hídrico, las extracciones y transferencias de agua constituyen componentes de salida, ya que representan volúmenes que son retirados o transferidos del embalse para atender diferentes demandas de uso del agua. A diferencia de las pérdidas naturales, estas salidas responden a decisiones de operación

y gestión del agua, por lo que su magnitud depende de las condiciones de disponibilidad y de los requerimientos de los distintos usuarios.

Entre las principales extracciones se encuentran las destinadas al abastecimiento de agua potable y al riego agrícola, mientras que las transferencias corresponden a los volúmenes conducidos hacia otros sistemas hidráulicos mediante operaciones de trasvase. En conjunto, estas componentes permiten satisfacer diferentes demandas de uso y optimizar la distribución del recurso hídrico conforme a las condiciones de operación del embalse.

Debido a que las extracciones y transferencias modifican directamente el volumen almacenado, su incorporación dentro del balance hídrico resulta indispensable para representar adecuadamente las salidas operativas del sistema y evaluar su influencia sobre la variación del almacenamiento del embalse.

3.3.7 Filtraciones en presas

Las filtraciones constituyen una de las componentes de salida que pueden intervenir en el balance hídrico de un embalse y corresponden al flujo de agua que atraviesa la cimentación, los estribos o el cuerpo de la presa como consecuencia del gradiente hidráulico generado por el almacenamiento del agua. Su magnitud depende de las características geológicas e hidrogeológicas del sitio, así como de las propiedades hidráulicas de los materiales que conforman la presa y su fundación (Fell et al., 2015).

En condiciones normales de operación, la presencia de filtraciones es un fenómeno esperado en la mayoría de las presas, ya que ningún sistema resulta completamente impermeable. Sin embargo, cuando los volúmenes filtrados aumentan debido a condiciones geológicas desfavorables, discontinuidades estructurales o cambios en las condiciones hidráulicas del embalse, estas pérdidas pueden adquirir una importancia significativa tanto desde el punto de vista de la seguridad de la infraestructura como de la disponibilidad del recurso hídrico.

Desde la perspectiva del balance hídrico, las filtraciones representan una componente de salida cuya cuantificación resulta necesaria para representar adecuadamente el comportamiento volumétrico del embalse. Debido a que una fracción del agua

almacenada abandona el sistema mediante flujo subterráneo, la estimación de esta componente contribuye a mejorar la consistencia del balance y la interpretación de la variación del almacenamiento (Chow et al., 1994).

La adecuada evaluación de las filtraciones resulta particularmente relevante en embalses localizados sobre medios geológicos complejos o permeables, donde el flujo subterráneo puede representar una fracción importante de las pérdidas de agua. En estos casos, el análisis de las filtraciones no solo permite comprender mejor el comportamiento hidrológico del embalse, sino que también proporciona elementos para evaluar la magnitud e influencia de esta componente dentro del balance hídrico.

3.3.8 Almacenamiento en embalses

Como resultado de la interacción entre las diferentes componentes del balance hídrico, el almacenamiento representa la cantidad de agua contenida en un embalse en un instante determinado y constituye la variable que integra el efecto conjunto de todas las entradas y salidas consideradas en el balance hídrico. Su comportamiento refleja la respuesta del sistema frente a las condiciones hidrológicas y operativas que ocurren durante un periodo de análisis, por lo que constituye uno de los principales indicadores del comportamiento hidrológico y operativo del embalse (Linsley et al., 1988).

El almacenamiento se expresa generalmente como un volumen de agua contenido en el embalse durante un instante determinado y suele representarse en unidades de volumen, como metros cúbicos (m^3) o hectómetros cúbicos (hm^3), a partir de los registros operativos del nivel y volumen almacenado. Estas mediciones permiten conocer la evolución del recurso hídrico disponible y evaluar las variaciones del almacenamiento a lo largo del tiempo.

La variación del almacenamiento depende del equilibrio existente entre los volúmenes que ingresan al embalse y aquellos que abandonan el sistema. Cuando las entradas son superiores a las salidas, el volumen almacenado aumenta; en cambio, cuando las salidas superan a las entradas, el almacenamiento disminuye. De esta manera, las fluctuaciones del almacenamiento representan la respuesta integrada del embalse ante la interacción de las diferentes componentes del balance hídrico (Chow et al., 1994).

Además de reflejar el comportamiento hidrológico del sistema, el almacenamiento constituye un parámetro fundamental para evaluar la disponibilidad del recurso hídrico y apoyar la operación de los embalses. Su seguimiento permite conocer la evolución del volumen disponible a lo largo del tiempo y analizar la respuesta del sistema frente a las condiciones climáticas y a las diferentes demandas de agua.

En este sentido, el análisis del almacenamiento proporciona una visión global del comportamiento volumétrico del embalse durante un periodo determinado y constituye un elemento fundamental para la interpretación de su dinámica hidrológica.

Los conceptos desarrollados en este subcapítulo 3.3 permitieron establecer los fundamentos teóricos del balance hídrico en embalses y de las principales componentes que intervienen en su comportamiento hidrológico. En conjunto, estos elementos proporcionan la base conceptual para comprender la dinámica del embalse, interpretar la variación de su almacenamiento y analizar la influencia que las filtraciones pueden ejercer dentro del balance hídrico.

3.4 Hidráulica de canales abiertos

La hidráulica de canales abiertos estudia el movimiento del agua en conductos en los que el flujo presenta una superficie libre sometida a la presión atmosférica, condición que se presenta tanto en canales artificiales como en cauces naturales. El comportamiento de este tipo de flujo está determinado por la interacción entre las características geométricas del cauce y las condiciones hidráulicas bajo las cuales circula el agua, por lo que su análisis permite describir el movimiento de las corrientes a superficie libre (Chow, 1994).

Entre las principales variables empleadas para caracterizar el flujo en canales abiertos se encuentran la geometría de la sección transversal, el tirante, la velocidad y el gasto. Estas variables se encuentran relacionadas entre sí y permiten representar las condiciones hidráulicas presentes en una corriente, así como cuantificar el volumen de agua que atraviesa una sección durante un intervalo determinado. Su conocimiento constituye, por tanto, la base para la medición y análisis del flujo en ríos y cauces mediante procedimientos de aforo (Chow, 1994).

3.4.1 Aforo de corrientes

La determinación del gasto mediante mediciones realizadas directamente en una corriente se denomina aforo. De acuerdo con Aparicio (1992), aforar una corriente consiste en determinar el gasto que pasa por una sección dada a partir de mediciones efectuadas en ella. Debido a que las características geométricas y las condiciones del flujo pueden variar entre diferentes cauces, existen distintos procedimientos para su determinación, cuya selección depende de las características del sitio, del régimen de la corriente y de los medios disponibles para efectuar las mediciones.

Entre los procedimientos empleados para el aforo de corrientes se encuentran los basados en secciones de control, en la relación entre las características hidráulicas del cauce, como el método sección–pendiente, y en la medición directa del área de la sección transversal y la velocidad del flujo mediante el método sección–velocidad. Asimismo, para la medición del gasto en ríos y canales pueden emplearse relaciones escala–gasto y diferentes estructuras o dispositivos hidráulicos, cuya aplicación depende de las condiciones bajo las cuales se realiza el aforo (IMTA, 1992).

3.4.2 Método sección-velocidad

En corrientes naturales, uno de los métodos más utilizados en México para el aforo de corrientes es el método sección–velocidad, el cual permite determinar el gasto a partir de la relación entre la geometría de una sección transversal y la velocidad del agua que circula a través de ella. Este procedimiento se basa en mediciones realizadas directamente sobre el cauce y permite considerar las características hidráulicas presentes en la sección analizada (Aparicio, 1992).

El método sección–velocidad se fundamenta en la ecuación de continuidad, mediante la cual el gasto que atraviesa una sección puede determinarse a partir del área hidráulica y de la velocidad media del flujo. Esta relación se expresa como:

$$Q = v \cdot A$$

Donde:

- Q = Gasto de la corriente (m^3/s).
- v = Velocidad media del flujo en la sección (m/s).
- A = Área hidráulica de la sección transversal (m^2).

En una corriente natural, tanto la geometría de la sección como la velocidad del flujo presentan variaciones a lo largo del cauce, por lo que la determinación del gasto requiere representar estas condiciones dentro de la sección transversal. Para ello, la sección puede dividirse en varias subsecciones denominadas dovelas (Figura 40), a las cuales se asignan un área y una velocidad media representativa (Aparicio, 1992).

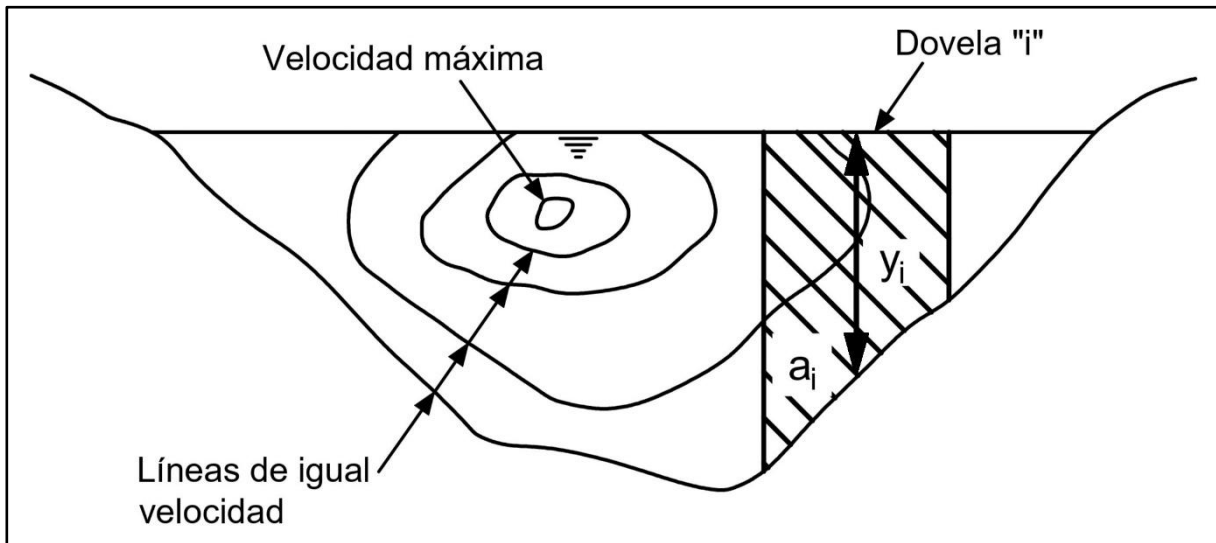


Figura 40. Representación de una dovela en la sección transversal de un río para la determinación del gasto (modificado de Aparicio, 1992).

A partir de esta subdivisión, el gasto correspondiente a cada dovela se determina mediante la relación:

$$q_i = a_i \cdot v_{mi}$$

Donde:

- q_i = Gasto correspondiente a la dovela i (m^3/s).
- a_i = Área de la dovela i (m^2).
- v_{mi} = Velocidad media en la dovela i (m/s).

La determinación del área hidráulica requiere conocer la geometría de la sección transversal y la profundidad del agua en diferentes puntos del cauce. En los métodos de área y velocidad, estas profundidades pueden obtenerse mediante sondeos distribuidos a lo largo de la sección, con los cuales se representa la configuración del lecho y se delimitan las áreas parciales utilizadas para el cálculo del gasto (IMTA, 1992).

Este procedimiento resulta particularmente importante en cauces naturales, donde las irregularidades del fondo producen variaciones en la profundidad y, por consiguiente, en el área correspondiente a cada dovela.

De manera complementaria, cada dovela requiere una velocidad media que represente el flujo que atraviesa su área. Debido a que la velocidad no se distribuye uniformemente dentro de una sección transversal, los valores empleados deben considerar las variaciones que se presentan en el flujo. De esta manera, la combinación del área y la velocidad media permite determinar individualmente el gasto que circula por cada una de las subdivisiones de la sección.

El gasto total de la corriente se obtiene mediante la suma de los gastos parciales calculados para las diferentes dovelas:

$$Q = \sum_{i=1}^n q_i$$

Donde:

- Q = Gasto total de la corriente (m^3/s).
- q_i = Gasto correspondiente a la dovela i (m^3/s).
- n = Número de dovelas en que se ha dividido la sección transversal.

La subdivisión de la sección permite integrar las variaciones de su geometría y de la velocidad del flujo en la determinación del gasto, evitando representar toda la corriente mediante condiciones uniformes. Por ello, la adecuada caracterización de ambas variables constituye un elemento fundamental para la aplicación del método sección–velocidad. En particular, la determinación de velocidades medias representativas requiere considerar la forma en que la velocidad varía dentro de la sección y con la profundidad.

3.4.3 Distribución de velocidades en una sección transversal

La velocidad del agua en una corriente natural no se distribuye de manera uniforme dentro de una sección transversal, sino que presenta variaciones tanto en sentido horizontal como vertical. Este comportamiento se encuentra influenciado por la

geometría del cauce, la rugosidad del lecho y las márgenes, así como por las condiciones hidráulicas del flujo. Como resultado, diferentes puntos de una misma sección pueden presentar velocidades distintas, por lo que su distribución debe considerarse para obtener valores representativos en la determinación del gasto.

La distribución transversal de la velocidad puede representarse mediante líneas de igual velocidad, también denominadas isotacas, las cuales permiten identificar la variación de la velocidad dentro de la sección. En términos generales, las velocidades disminuyen hacia el lecho y las márgenes debido al efecto del rozamiento, mientras que los valores mayores tienden a localizarse hacia las zonas interiores del flujo. Esta distribución depende de las características particulares de la sección y puede modificarse por irregularidades del cauce y por las condiciones bajo las cuales circula el agua (IMTA, 1992).

De manera complementaria, la velocidad también presenta variaciones con la profundidad. En una vertical de medición, los valores próximos al fondo se encuentran condicionados por la resistencia ejercida por el lecho y aumentan progresivamente al alejarse de éste. La forma resultante constituye el perfil vertical de velocidades, a partir del cual puede establecerse una velocidad media representativa del flujo en este mismo. La distribución transversal y el comportamiento de la velocidad con la profundidad se muestran de manera esquemática en la Figura 41.

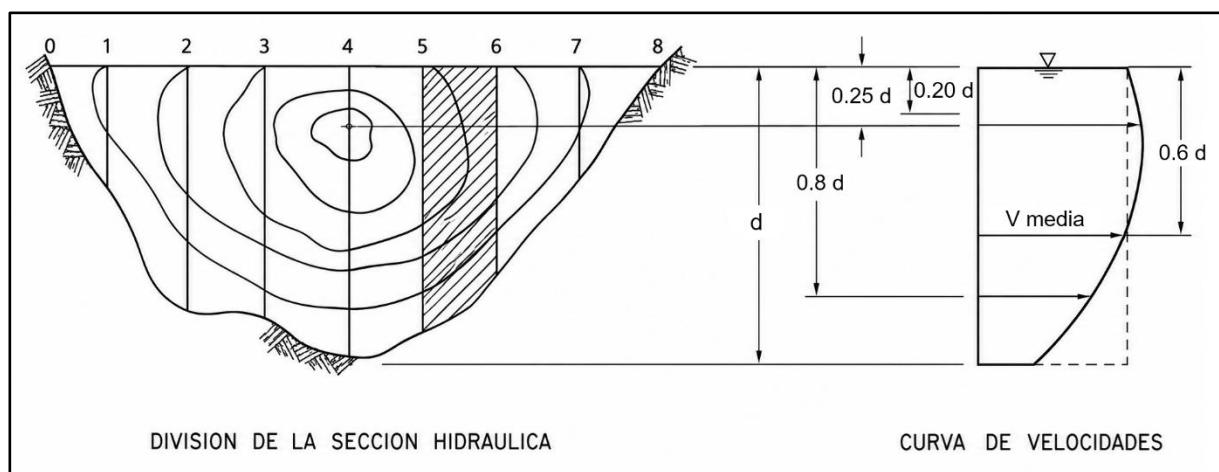


Figura 41. Distribución de velocidades en una sección transversal y perfil vertical de velocidad en una corriente (modificado de IMTA, 1992).

La determinación de la velocidad media en una vertical puede realizarse mediante mediciones efectuadas a profundidades seleccionadas del tirante. El Manual de aforos del IMTA establece diferentes criterios en función del número de observaciones disponibles y de las condiciones de medición. Cuando se dispone de una sola observación, la velocidad medida a una profundidad de $0.6d$, considerada desde la superficie, puede utilizarse como una aproximación de la velocidad media de la vertical. Cuando se realizan dos observaciones, normalmente a $0.2d$ y $0.8d$, la velocidad media puede obtenerse a partir del promedio de ambas mediciones (IMTA, 1992).

Para una mayor caracterización de la distribución vertical pueden emplearse mediciones en varios puntos del tirante. La incorporación de observaciones a distintas profundidades permite representar con mayor detalle la forma del perfil y estimar la velocidad media a partir de la distribución obtenida. En estos casos, el valor medio corresponde a una representación del efecto conjunto de las diferentes velocidades presentes entre la superficie y el fondo, en lugar de depender exclusivamente de una medición puntual.

La selección del número y ubicación de las mediciones depende de las características de la corriente, de la profundidad disponible y de las condiciones bajo las cuales se realiza el aforo. Por ello, los procedimientos de medición buscan obtener velocidades que permitan representar adecuadamente el comportamiento del flujo en las diferentes verticales de la sección. A su vez, estas velocidades se utilizan para determinar los valores medios correspondientes a las subsecciones consideradas (dovelas) en el cálculo del gasto.

En conjunto, el conocimiento de la distribución transversal y vertical de velocidades permite representar con mayor precisión las condiciones hidráulicas presentes en una corriente. La obtención de velocidades medias representativas, juntamente con la geometría de la sección transversal, proporciona los elementos necesarios para determinar los gastos parciales y, mediante su integración, estimar el gasto total mediante el método sección-velocidad.

CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA

4.1 Estudio bibliográfico

Se llevó a cabo una revisión bibliográfica mediante la recopilación, análisis y organización de información técnica y científica, con el propósito de obtener conocimientos tanto generales como especializados relacionados con el desarrollo de la presente investigación. Este proceso permitió establecer el sustento teórico del estudio y definir el enfoque metodológico adoptado.

La revisión se enfocó en la obtención de información sobre las características físicas y ambientales del área de estudio, tales como ubicación, clima, fisiografía, geología, hidrología e hidrogeología, así como en el análisis de antecedentes, informes técnicos y estudios previos asociados a la presa El Cuchillo.

De manera complementaria, se examinaron investigaciones realizadas en presas de características similares, en las que se aplicaron metodologías afines para el análisis de filtraciones, con el objetivo de comparar enfoques, identificar criterios técnicos relevantes y fortalecer la estructura metodológica del presente trabajo.

Las fuentes consultadas incluyeron artículos científicos, tesis de licenciatura y posgrado, libros especializados, obras colectivas, memorias de congresos, normas oficiales, así como reportes e informes técnicos emitidos por organismos gubernamentales. La integración de esta información permitió contar con antecedentes pertinentes y confiables, los cuales respaldan tanto el desarrollo metodológico como la interpretación de los resultados obtenidos.

Asimismo, la revisión permitió identificar que, si bien existen diversos estudios relacionados con problemas asociados a filtraciones en presas de materiales sueltos, estos se enfocan principalmente en evaluaciones particulares y, en muchos casos, carecen de un enfoque metodológico integral para su análisis.

En este contexto, el presente trabajo retoma criterios técnicos reportados en la literatura y los integra en una propuesta metodológica estructurada, orientada al análisis espacial, hidrogeológico e hidrológico de los procesos de filtración.

4.2 Documentación de las Filtraciones

4.2.1 Identificación y caracterización de las zonas afectadas

Se realizó trabajo de campo con el propósito de identificar, registrar y caracterizar las áreas que presentan afectaciones asociadas a las filtraciones provenientes de la Presa El Cuchillo. Estas actividades permitieron documentar los impactos visibles que actualmente se manifiestan en el área de estudio, particularmente en la cabecera municipal de China, Nuevo León.

Los recorridos permitieron obtener información directa (*in situ*) sobre los puntos afectados mediante observaciones visuales detalladas, enfocadas en la identificación de indicadores físicos de alteración, entre los que destacan:

- **Problemas de humedad y ensalitramiento** en viviendas y suelos, derivado de la saturación hídrica persistente y de la acumulación de sales ocasionada por la evaporación continua del agua retenida en superficie.



Figura 42. Viviendas en la localidad de China, N.L. que presentan problemas de humedad y ensalitramiento (elaboración propia, 2021).

- **Zonas con saturación hídrica**, caracterizadas por la presencia de suelos húmedos, encharcamientos o inundaciones de pequeña extensión, que limitan el uso del suelo para actividades habitacionales, agrícolas y de tránsito.



Figura 43. Zona con saturación hídrica, donde se observa el espejo de agua, localizada en un terreno de la localidad de China, aguas abajo de la cortina (elaboración propia, 2021).



Figura 44. Zona con saturación hídrica, donde se observa el espejo de agua, ubicada junto a la autopista Monterrey-Reynosa, aguas abajo del dique (elaboración propia, 2021).

- **Presencia de vegetación hidrófila**, particularmente tule, también denominado junco o espadaña (*Schoenoplectus acutus*), una especie típica de ambientes lacustres y pantanosos de Norteamérica que es indicadora de condiciones de saturación hídrica permanente. Por lo que su establecimiento en el área de estudio, donde no es nativa, sugiere modificaciones en las condiciones hidrológicas locales, así como en las condiciones ecológicas.



Figura 45. Presencia de tule en una extensa área, indicativa de suelos saturados o anegados, ubicada en las afueras de la localidad de China, N.L. (elaboración propia, 2021).



Figura 46. Presencia extensiva de tule en un terreno privado, con alta densidad que puede interferir con actividades humanas y uso de suelo, localizado aguas abajo de la cortina (elaboración propia, 2021).

- **Sectores con desarrollo de humedales**, originados por la acumulación permanente de agua derivada de filtraciones en extensiones considerables de terreno, los cuales han modificado las condiciones naturales del entorno y generan afectaciones en la infraestructura local, así como en los usos del suelo.



Figura 47. Humedal (lado izquierdo de la imagen) donde se observa el espejo de agua y la presencia de tule, ubicado dentro de la localidad de China, Nuevo León (elaboración propia, 2021).



Figura 48. Humedal donde se observa el espejo de una extensa acumulación de agua y la presencia de tule en gran parte del terreno, localizado agua abajo del dique (elaboración propia, 2021).

Como parte del trabajo, se realizó un registro fotográfico, levantamiento de coordenadas geográficas, notas de campo y entrevistas breves con pobladores, lo que permitió documentar la evolución de las afectaciones y su impacto en el entorno.

La información obtenida permitió delimitar y georreferenciar de manera preliminar las zonas críticas, estableciendo una relación inicial entre los patrones espaciales de filtración, las condiciones topográficas y los daños observados.

4.2.2 Mapeo de las zonas afectadas

Con base en la información obtenida durante los recorridos de campo, se comenzó con el mapeo de las zonas afectadas, mediante el uso de herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG), empleando imágenes satelitales de alta resolución disponibles en las plataformas Google Earth Pro y Microsoft Bing Maps.

Los puntos registrados en campo fueron utilizados como referencias espaciales iniciales para la localización de las áreas afectadas. A partir de estos puntos, se realizó una inspección visual preliminar, lo que permitió identificar zonas adicionales con características similares, tales como encharcamientos, suelos húmedos, presencia de vegetación hidrófila y zonas con condiciones de humedal (Figura 49).

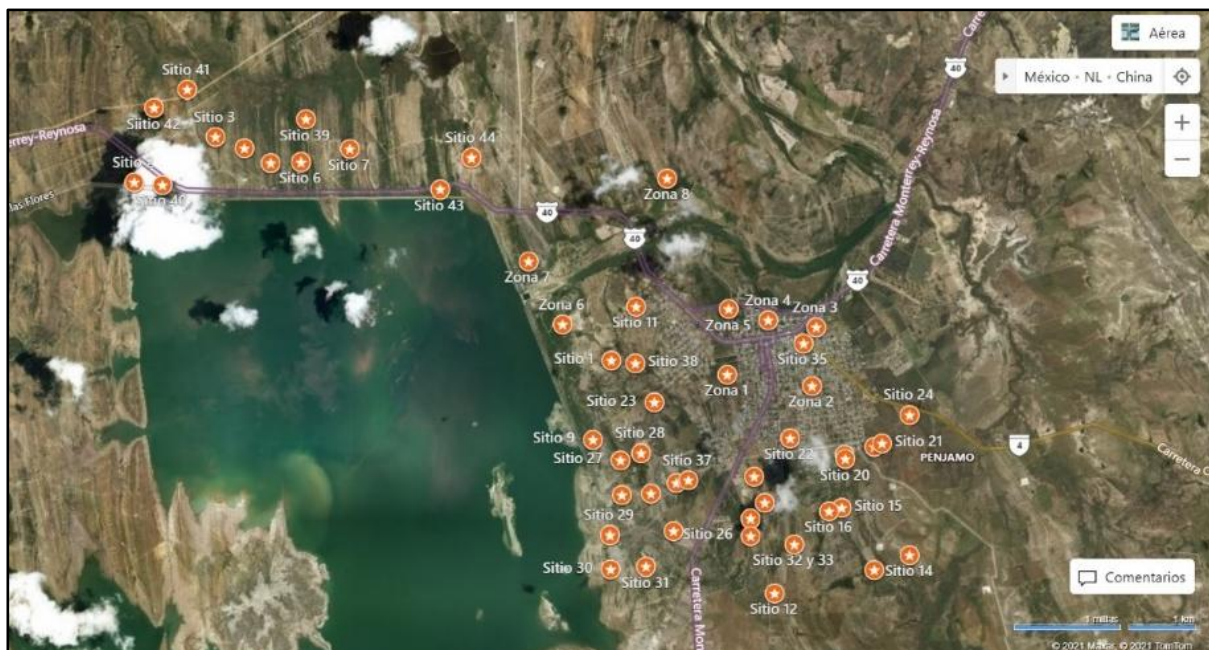


Figura 49. Ubicación de las zonas afectadas, identificadas mediante visitas de campo y análisis remoto (elaboración propia a partir de imagen satelital de Microsoft Bing Maps, 2021).

Este procedimiento permitió ampliar el número de áreas identificadas, incorporando zonas que, debido a su gran extensión, difícil acceso o ubicación aislada, no pudieron ser reconocidas directamente durante los recorridos de campo. De esta manera, se generó un inventario más completo y representativo de las afectaciones, el cual sirvió como base para el análisis espacial posterior.

Con el fin de mejorar la confiabilidad del mapeo, las áreas identificadas fueron contrastadas entre las plataformas Google Earth Pro y Microsoft Bing Maps, mediante un proceso de validación visual cruzada. Esta comparación permitió corroborar la consistencia en la ubicación y extensión de las áreas afectadas, reduciendo posibles errores asociados a diferencias en resolución espacial, fecha de captura o condiciones de las imágenes.

El resultado de este proceso fue la integración de un inventario espacial de zonas afectadas (Figuras 50 y 51), que constituye la base para el análisis multitemporal y la delimitación detallada de las áreas con influencia de filtraciones, descritos en el apartado siguiente.

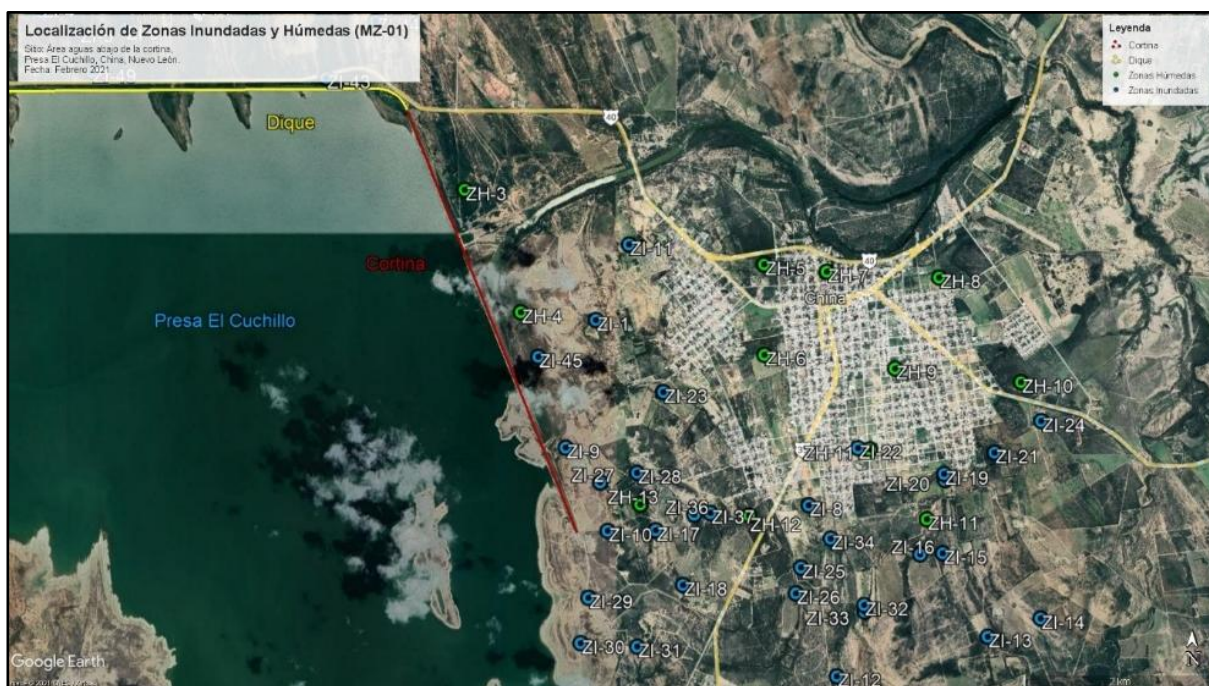


Figura 50. Localización de zonas con saturación hídrica (ZH) y zonas de humedales (ZI), en zona aguas abajo de la cortina (elaboración propia a partir de imagen satelital de Google Earth Pro, 2021).

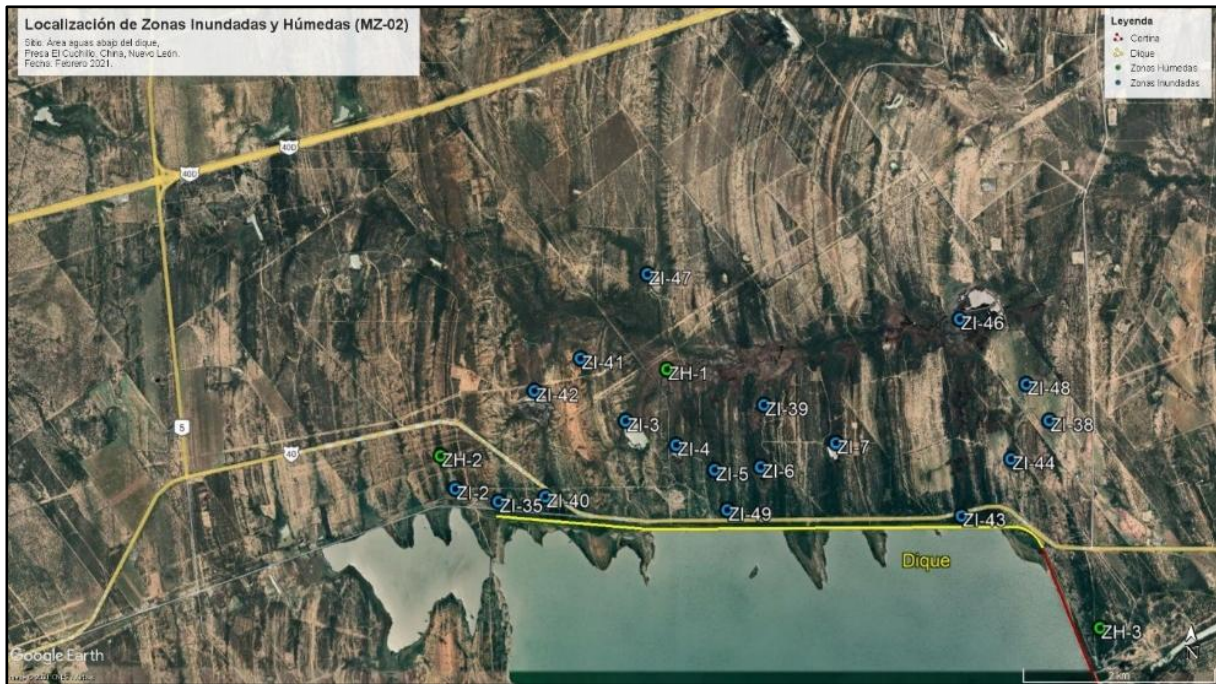


Figura 51. Localización de zonas con saturación hídrica (ZH) y zonas de humedales (ZI), en zona aguas abajo del dique (elaboración propia a partir de imagen satelital de Google Earth Pro, 2021).

4.2.3 Análisis multitemporal y delimitación espacial de las áreas afectadas

A partir de las zonas identificadas, tanto en campo como de manera remota, se realizó un análisis multitemporal mediante la comparación de imágenes satelitales históricas disponibles en la plataforma Google Earth Pro. Para esta etapa de la investigación, dicha herramienta constituyó el principal medio de análisis espacial, ya que permite consultar imágenes correspondientes a diferentes fechas mediante su función de imágenes históricas. Este enfoque permitió incorporar la dimensión temporal en la interpretación, facilitando la identificación de cambios y persistencias en las condiciones de humedad y acumulación de agua asociadas a los procesos de filtración.

Las imágenes empleadas fueron obtenidas de la serie histórica disponible para cada zona de estudio, lo que permitió evaluar la evolución espacial y temporal de las áreas afectadas. El análisis se fundamentó en la aplicación de criterios de interpretación visual previamente definidos en el marco teórico, los cuales fueron adaptados a las características de las imágenes satelitales utilizadas. Entre los principales criterios empleados destacan:

- **Tonalidad y color:** utilizados para diferenciar zonas secas de áreas con alta humedad o presencia de agua, las cuales presentan tonalidades más oscuras o variaciones características asociadas a suelos saturados.
- **Textura:** permitió distinguir superficies homogéneas de áreas con irregularidades asociadas a encharcamientos, vegetación hidrófila o suelos alterados por humedad persistente.
- **Forma y tamaño:** empleada para reconocer patrones irregulares en la distribución de cuerpos de agua someros y zonas inundadas, generalmente asociados a procesos naturales de acumulación, así como para dimensionar la extensión de las áreas afectadas.
- **Patrón espacial:** considerado para identificar la disposición, continuidad y distribución de las áreas afectadas, así como su posible relación con trayectorias preferenciales de flujo.
- **Asociación y contexto:** permitió relacionar las zonas identificadas con elementos del entorno, tales como la cortina, el dique y las áreas aguas abajo de la presa, donde se presentan condiciones favorables para la ocurrencia de filtraciones.

La integración de estos criterios permitió realizar una interpretación más robusta de las imágenes, facilitando la delimitación de las áreas afectadas y la identificación de patrones espaciales asociados a la dinámica del agua. Asimismo, el análisis multitemporal permitió evaluar la evolución de dichas áreas, distinguiendo entre zonas con presencia permanente de humedad y aquellas que presentan variaciones espaciales a lo largo del tiempo, lo cual constituye un elemento clave para la identificación de posibles procesos de filtración.

Posteriormente, se llevó a cabo la delimitación espacial de las áreas afectadas mediante la digitalización manual de polígonos, en su mayoría de geometría irregular, tomado como referencia los límites visibles en las imágenes satelitales analizadas (Figuras 52 y 53).

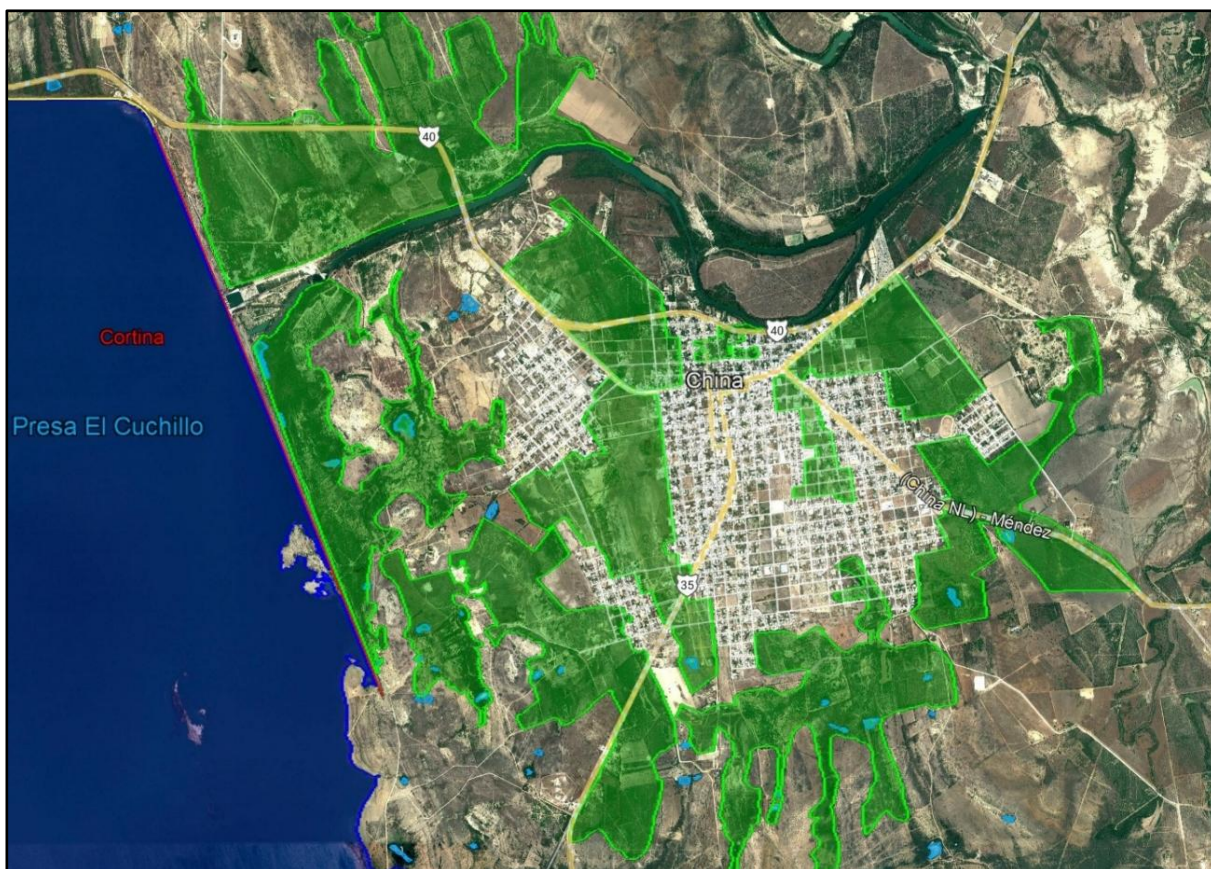


Figura 52. Delimitación espacial de las áreas afectadas, en zona aguas debajo de la cortina (elaboración propia a partir de imagen satelital de Google Earth Pro, 2021).

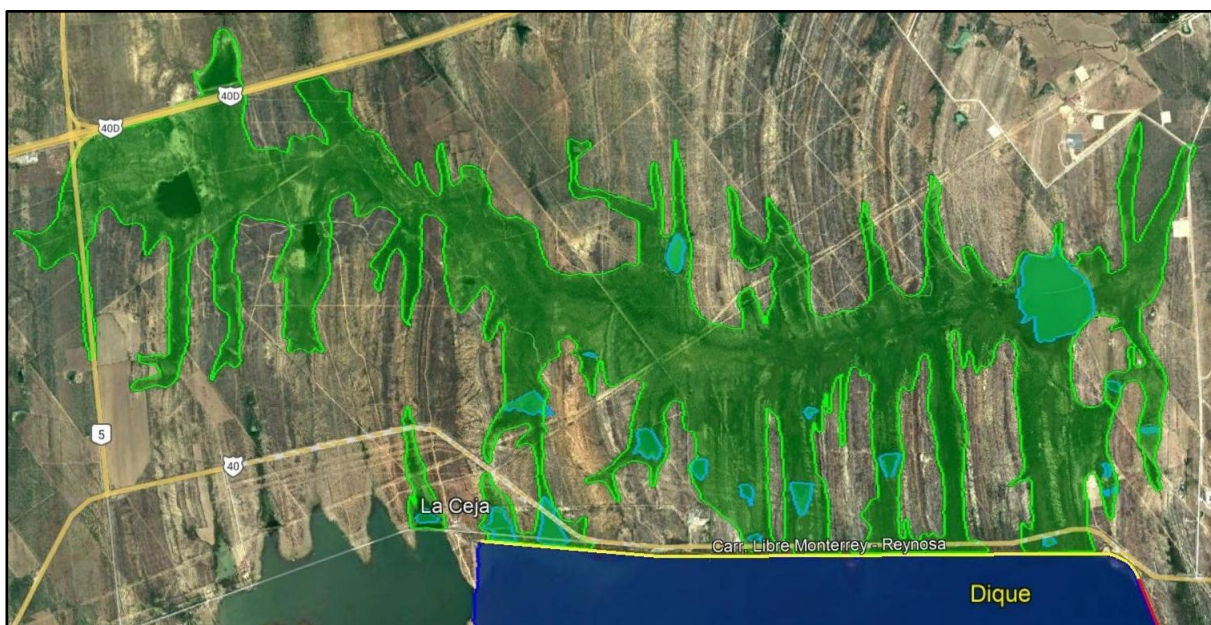


Figura 53. Delimitación espacial de las áreas afectadas, en zona aguas abajo del dique (elaboración propia a partir de imagen satelital de Google Earth Pro, 2021).

La delimitación se llevó a cabo bajo criterios espaciales homogéneos, considerando la continuidad de las superficies inundadas, la persistencia de humedad en el suelo, la densidad y extensión de la vegetación característica de ambientes húmedos, la presencia de humedales y la relación topográfica con la infraestructura hidráulica de la presa, con especial atención en las zonas ubicadas aguas abajo de la cortina y el dique.

Los datos obtenidos durante los recorridos de campo fueron utilizados como puntos de control para ajustar y validar la delimitación, lo que permitió mejorar la precisión del análisis espacial.

4.2.4 Elaboración de cartas de filtraciones

Para la elaboración de la cartografía se seleccionaron los años 2009, 2019 y 2021 como periodos de análisis. Estos años fueron elegidos en función de la disponibilidad de imágenes satelitales de alta resolución espacial, cobertura completa del área de estudio y condiciones visuales favorables que permitieran la correcta identificación de zonas con saturación hídrica, inundaciones y vegetación hidrófila. La selección de estos periodos garantizó la comparabilidad espacial y temporal de la información cartográfica generada.

A partir de los polígonos delimitados para cada periodo, se realizó una estimación aproximada de la superficie total afectada por las filtraciones en distintos años, proporcionando un referente cuantitativo del alcance territorial de la problemática. Esta información resulta fundamental para dimensionar los impactos ambientales y territoriales derivados de las filtraciones, así como para su posterior análisis en relación con la pérdida de volumen de agua almacenada y la posible afectación al suministro de agua potable hacia el Área Metropolitana de Monterrey.

Con el fin de facilitar la organización, interpretación y referencia de la cartografía generada, las cartas elaboradas se identificaron mediante un sistema de codificación alfanumérico, el cual se compone de tres elementos principales: el tipo de carta, el periodo temporal analizado y la zona de estudio.

El prefijo “**CF**” corresponde a **Carta de Filtraciones**, indicando que los mapas representan áreas con indicios de afectación relacionados con posibles procesos de

filtración. Los dos dígitos siguientes hacen referencia al *periodo temporal analizado*, empleando los dos últimos dígitos del año correspondiente (por ejemplo, 09, 19 y 21 para los años 2009, 2019 y 2021, respectivamente). Finalmente, los sufijos **“Z01”** y **“Z02”** identifican las zonas de estudio definidas dentro del área de influencia de la presa, correspondientes a las áreas ubicadas **aguas abajo de la cortina** y **aguas abajo del dique**, respectivamente, las cuales se mantiene constantes a lo largo del análisis.

En el caso de las cartas de análisis multitemporal, donde se realiza la comparación espacial de las filtraciones entre los distintos periodos, se emplea el prefijo **“COMP”**, el cual hace referencia a un **análisis comparativo**. De esta manera, estas cartas se identifican como “CF-COMP-Z01” y “CF-COMP-Z02”, manteniendo la coherencia con el esquema general de codificación.

Este sistema de codificación permite una identificación clara, consistente y sistemática de los productos cartográficos generados, facilitando su consulta, interpretación y comparación temporal dentro del desarrollo del presente estudio.

4.3 Análisis hidrogeológico del régimen de flujo subterráneo

4.3.1 Compilación y análisis de información hidrogeológica

Se realizó una recopilación y revisión de información hidrogeológica existente, con el propósito de contar con antecedentes técnicos que permitieran sustentar el análisis del régimen de flujo subterráneo en el área de estudio.

La información consultada incluyó cartografía geológica e hidrogeológica regional, estudios técnicos, bases de datos institucionales e informes relacionados con el acuífero China–General Bravo, correspondiente al sistema hidrogeológico regional donde se localiza la Presa El Cuchillo. Asimismo, se revisaron investigaciones y documentos técnicos asociados a la presa, particularmente aquellos relacionados con filtraciones, niveles del embalse y comportamiento hidráulico de la infraestructura.

La compilación de esta información permitió identificar antecedentes relevantes sobre las condiciones hidrogeológicas del área, así como reconocer la disponibilidad de datos piezométricos y posibles puntos de observación utilizados en estudios previos.

Es importante señalar que esta etapa tuvo un carácter principalmente documental y de apoyo interpretativo, por lo que no implicó la realización de estudios directos del subsuelo ni la determinación de parámetros geológicos, hidráulicos o hidrogeoquímicos. La información recopilada se empleó como referencia para sustentar el análisis piezométrico y la interpretación general del flujo subterráneo en el área de influencia de la presa.

La integración de estos antecedentes constituyó la base para la selección y análisis de los puntos piezométricos utilizados posteriormente en la elaboración de las cartas piezométricas.

4.3.2 Identificación y selección de puntos piezométricos

Con el objetivo de analizar el régimen de flujo subterráneo en el área de estudio, se realizó un proceso de identificación y selección de puntos de medición piezométrica que permitieran contar con información confiable sobre los niveles del agua subterránea. Este proceso incluyó actividades de reconocimiento en campo, análisis de imágenes satelitales y revisión de bases de datos institucionales.

Reconocimiento de campo

Inicialmente, se llevaron a cabo recorridos de campo en el área de influencia de la Presa El Cuchillo y zonas aledañas, con la finalidad de localizar aprovechamientos hidráulicos, tales como pozos y norias, que pudieran ser utilizados como puntos de control piezométrico. Durante estos recorridos se constató la presencia limitada de infraestructura activa de aprovechamiento de agua subterránea, así como dificultades para acceder a mediciones directas del nivel freático, ya sea por el abandono de estructuras o por restricciones de acceso.

De manera complementaria, se realizó una búsqueda mediante la interpretación de imágenes satelitales de alta resolución, con el propósito de identificar posibles aprovechamientos hidráulicos adicionales que no hubieran sido detectados durante el trabajo de campo. Los sitios identificados fueron posteriormente verificados en campo; sin embargo, no fue posible incrementar de manera significativa el número de puntos con condiciones adecuadas para su incorporación al análisis.

Como resultado de estas actividades, se identificaron algunos aprovechamientos hidráulicos, los cuales fueron registrados y documentados mediante la toma de coordenadas geográficas, registro fotográfico y descripción de su condición actual. La información recabada fue organizada en una base de datos digital (Tabla 4), con el fin de sistematizar los datos obtenidos durante el trabajo de campo.

Aprovechamientos Hidráulicos Identificados en Campo										
Ubicación: <u>China, Nuevo León.</u>										
N°	Descripción		Estatus	Coordenadas		Elevación Brocal (msnm)	Mediciones			
	Tipo	Nombre		Latitud	Longitud		Fecha	Profundidad (m)	Conductividad Eléctrica ($\mu\text{S/cm}$)	Elevación Nivel Estático (msnm)
1	Pozo	PZ-1	Pozo Equipado Inactivo	25.719540	-99.217907	139.00	29/03/2021	8.96	11.80	130.04
							26/06/2021	8.95	10.70	130.05
							01/10/2021	9.25	16.60	129.75
2	Noria	NR-1	Fuera de Operación	25.710039	-99.243893	-	29/03/2021	-	-	-
3	Noria	NR-2	Sin Acceso	25.707708	-99.243530	-	29/03/2021	-	-	-

Tabla 4. Aprovechamientos hidráulicos identificados en campo (elaboración propia, 2021).

El **Pozo 1 (PZ-1)** corresponde a un pozo de extracción equipado, el cual se encontraba inactivo durante las visitas de inspección. En este punto fue posible obtener información durante tres periodos distintos de muestreo, correspondientes a las fechas que se muestra en la Tabla 4. Se tomaron lecturas de profundidad al nivel del agua para la determinación del nivel estático, así como mediciones de conductividad eléctrica.



Figura 54. Identificación y medición del Pozo 1 (PZ-1) (elaboración propia, 2021).

La **Noria 1 (NR-1)** fue localizada durante los recorridos de campo; sin embargo, se encontraba sellada y fuera de operación, por lo que no fue posible observar el espejo de agua ni realizar mediciones. Por lo tanto, únicamente se registraron sus coordenadas geográficas y su condición de inactividad, quedando documentada como infraestructura existente pero no funcional para fines piezométricos.



Figura 55. Identificación de la Noria 1 (NR-1) (elaboración propia, 2021).

La **Noria 2 (NR-2)** fue identificada visualmente; no obstante, durante el periodo de estudio no fue posible obtener acceso al sitio, lo que impidió la verificación directa de su estado y la realización de mediciones. Por este motivo, fue registrada en la base de datos como punto identificado sin acceso.

Los aprovechamientos hidráulicos identificados fueron georreferenciados e incorporados en Google Earth Pro (Figura 56), con el fin de contar con una localización precisa y facilitar su análisis espacial dentro del área de estudio. Sin embargo, la información piezométrica obtenida directamente en campo resultó limitada e insuficiente para desarrollar un análisis integral de la dinámica del agua subterránea en la zona de estudio, por lo que fue necesario complementar la información mediante la consulta de fuentes secundarias y/o bases de datos institucionales.

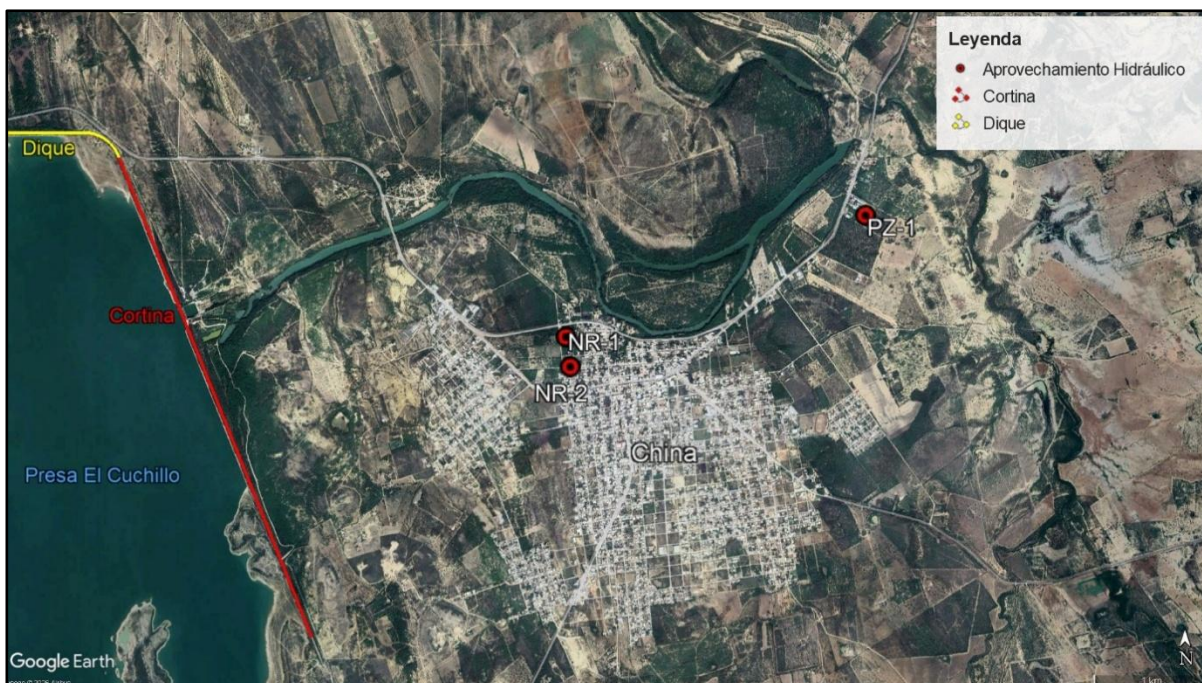


Figura 56. Localización de aprovechamientos hidráulicos identificados en campo (elaboración propia a partir de imagen satelital de Google Earth Pro, 2021).

A pesar de las limitaciones encontradas para la obtención de mediciones directas de nivel freático, la información recabada durante los recorridos de campo se incorporó en la presente investigación como evidencia de las actividades de reconocimiento realizadas y del esfuerzo por obtener datos actuales y dentro del área de estudio.

Consulta de bases de datos institucionales

Ante la limitada información obtenida en campo y con el propósito de contar con datos que permitieran analizar el comportamiento regional del flujo subterráneo, se recurrió a la consulta de bases de datos oficiales disponibles en la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). Estas bases concentran registros históricos de niveles estáticos medidos en pozos registrados, constituyendo una de las principales fuentes de información para estudios hidrogeológicos regionales en México.

La búsqueda de información se realizó mediante el Portal de Sistemas de Información del Agua de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), específicamente a través del Sistema Nacional de Información del Agua (SINA), en el apartado de “Pozos piezométricos” (Figura 57), así como en el Sistema de Información Geográfica de Aguas Subterráneas (SIGAGIS) de la Gerencia de Aguas Subterráneas (Figura 58). Ambas

plataformas permiten consultar registros piezométricos, incluyendo ubicación geográfica, elevación del brocal, profundidad medida y años de medición.

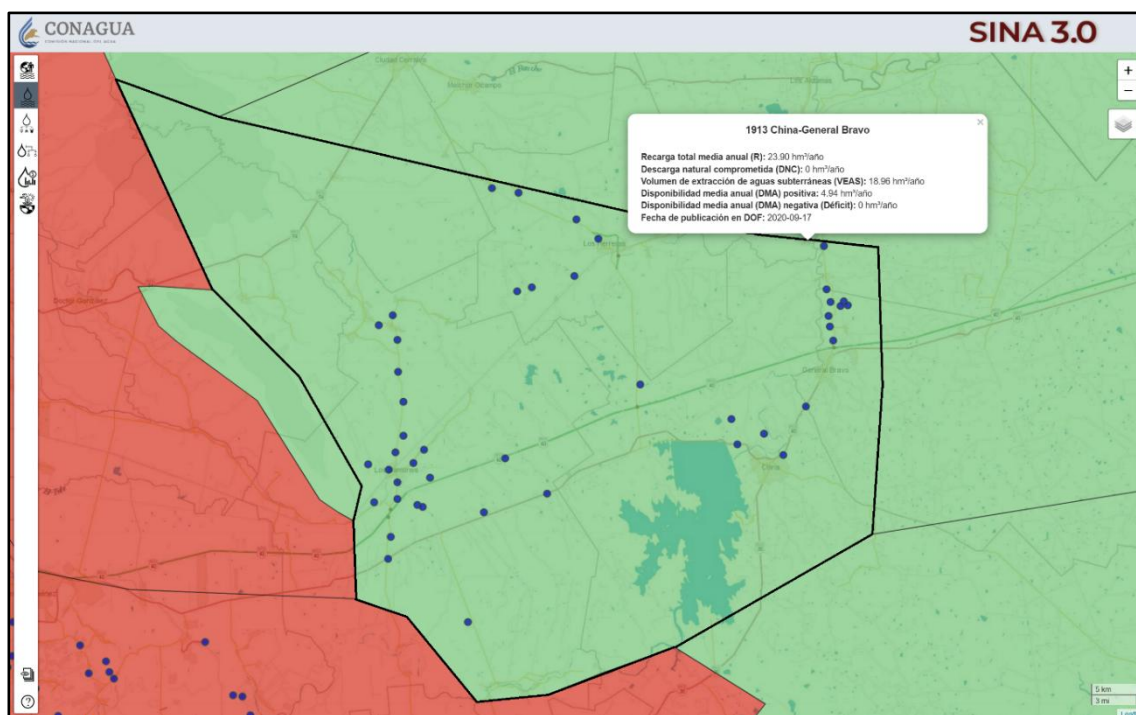


Figura 57. Visor interactivo del Sistema Nacional de Información del Agua (SINA) (elaboración propia a partir del visor interactivo de CONAGUA, 2021).

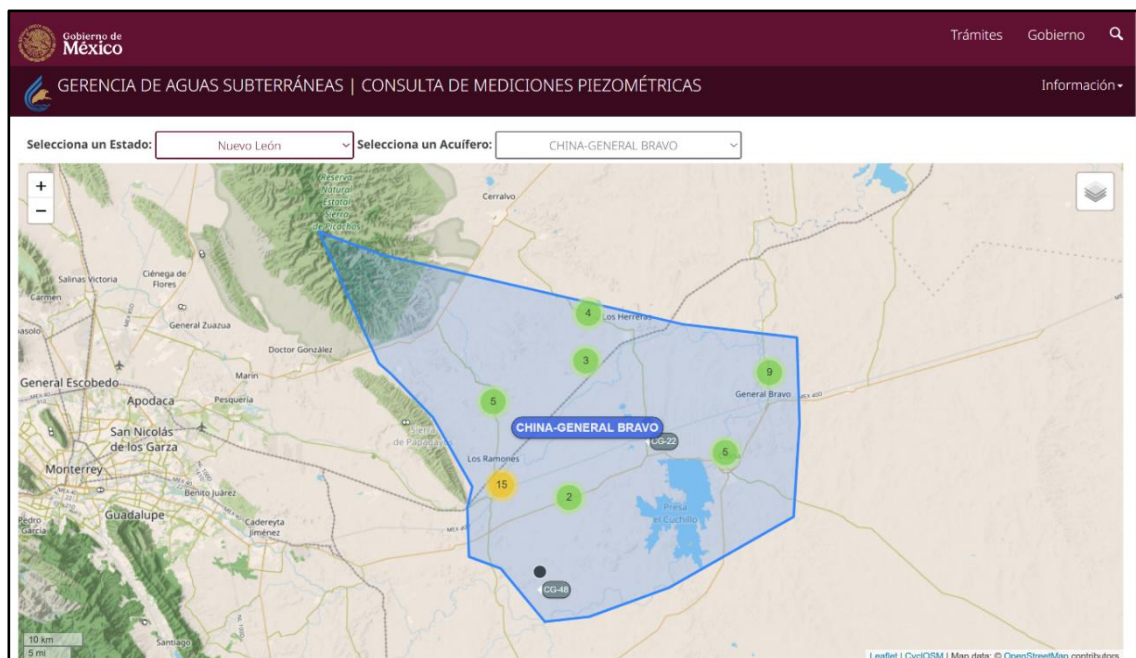


Figura 58. Visor interactivo del Sistema de Información Geográfica de Aguas Subterráneas (SIGAGIS) (elaboración propia a partir del visor interactivo de CONAGUA, 2021).

Al contrastar la información disponible en ambas plataformas, se constató la consistencia y coincidencia de los registros consultados, lo que permitió validar la confiabilidad de los datos utilizados en el estudio.

A partir de la revisión de estas bases de datos, se identificó que el acuífero China–General Bravo cuenta con un total de 45 pozos piezométricos disponibles, cada uno identificado mediante un número y nombre de pozo (Tabla 5). Debido a que la información se encontraba dispersa y presentada de manera individual para cada pozo dentro de los visores interactivos, fue necesario recopilarla y concentrarla en una base de datos propia, permitiendo organizar homogéneamente los registros para su posterior análisis.

Cabe señalar que los registros históricos disponibles para este acuífero corresponden únicamente a los años 2005, 2006, 2007 y 2009, siendo estos los periodos con información suficiente y consistente para el desarrollo del análisis piezométrico.

Pozos Piezométricos - Acuífero China-General Bravo (1913)					
Organismo de Cuenca: <u>Río Bravo (VI)</u>					
Estado: <u>Nuevo León</u>					
N°	Pozo		Coordenadas		Elevación Brocal (msnm)
	Núm.	Nombre	Latitud	Longitud	
1	3850	CG-2	25.961944	-99.524167	200.50
2	3851	CG-3	25.957500	-99.496944	187.00
3	3852	CG-4	25.932500	-99.437222	166.00
4	3853	CG-5	25.915000	-99.414722	154.00
5	3854	CG-6	25.907778	-99.181667	116.00
6	3855	CG-7	25.880000	-99.439167	155.00
7	3856	CG-8	25.869444	-99.483056	165.00
8	3857	CG-9	25.866111	-99.498333	184.00
9	3858	CG-10	25.868056	-99.178889	116.00
10	3859	CG-11	25.855833	-99.174722	121.00
11	3860	CG-12	25.856667	-99.161111	125.00
12	3861	CG-13	25.852222	-99.165000	122.00
13	3862	CG-14	25.853333	-99.157222	126.00
14	3863	CG-15	25.843889	-99.626944	205.00
15	3864	CG-16	25.843056	-99.177222	124.00
16	3865	CG-17	25.834722	-99.641111	209.50
17	3866	CG-18	25.833056	-99.175556	125.00
18	3867	CG-19	25.821111	-99.622222	198.00
19	3868	CG-20	25.820278	-99.171944	126.00
20	3869	CG-21	25.791111	-99.621111	191.00
21	3870	CG-22	25.779444	-99.371389	186.00
22	3871	CG-23	25.763333	-99.615556	195.00
23	3872	CG-24	25.758889	-99.200556	148.00
24	3873	CG-25	25.747222	-99.277222	150.00
25	3874	CG-26	25.733611	-99.243611	140.00
26	3875	CG-27	25.731667	-99.616111	201.00
27	3876	CG-28	25.723889	-99.271389	147.00
28	3877	CG-29	25.718611	-99.594444	200.50
29	3878	CG-30	25.716667	-99.623889	207.00
30	3879	CG-31	25.711111	-99.510556	191.00
31	3880	CG-32	25.714167	-99.223611	138.00
32	3881	CG-33	25.705556	-99.652500	206.00
33	3882	CG-34	25.706667	-99.605556	200.50
34	3883	CG-35	25.700556	-99.631111	213.00
35	3884	CG-36	25.693056	-99.588333	211.00
36	3885	CG-37	25.688333	-99.621667	212.00
37	3886	CG-38	25.667222	-99.601111	208.00
38	3887	CG-39	25.677778	-99.467500	201.00
39	3888	CG-40	25.673333	-99.622222	220.00
40	3889	CG-41	25.670278	-99.646111	223.00
41	3890	CG-42	25.665556	-99.596111	210.00
42	3891	CG-44	25.660833	-99.532778	203.00
43	3892	CG-46	25.638056	-99.628611	222.00
44	3893	CG-47	25.617500	-99.631667	237.00
45	3894	CG-48	25.558333	-99.548889	221.00

Tabla 5. Pozos piezométricos del acuífero China-General Bravo (elaboración propia, 2021).

Selección de puntos piezométricos

El área de estudio se localiza en el límite sureste del acuífero China–General Bravo, condición que implica una distribución no homogénea de los puntos piezométricos en sus alrededores. Si bien existen pozos cercanos y dentro del área de influencia de la

presa hacia el noreste, oeste y noroeste, no se registran puntos hacia el sureste debido a que dicha zona coincide con el límite del acuífero.

Ante esta situación, se extendió la búsqueda de información hacia los acuíferos colindantes localizados al sur y sureste del área de estudio (Figura 59), con el objetivo de identificar posibles puntos complementarios para el análisis del flujo subterráneo. Sin embargo, estas zonas colindantes se caracterizan por una baja densidad de asentamientos humanos y escasa infraestructura de comunicación y servicios, como caminos, vialidades y viviendas, lo que se refleja en la ausencia de aprovechamientos hidráulicos y, por consiguiente, de puntos de medición piezométrica que pudieran incorporarse al estudio.

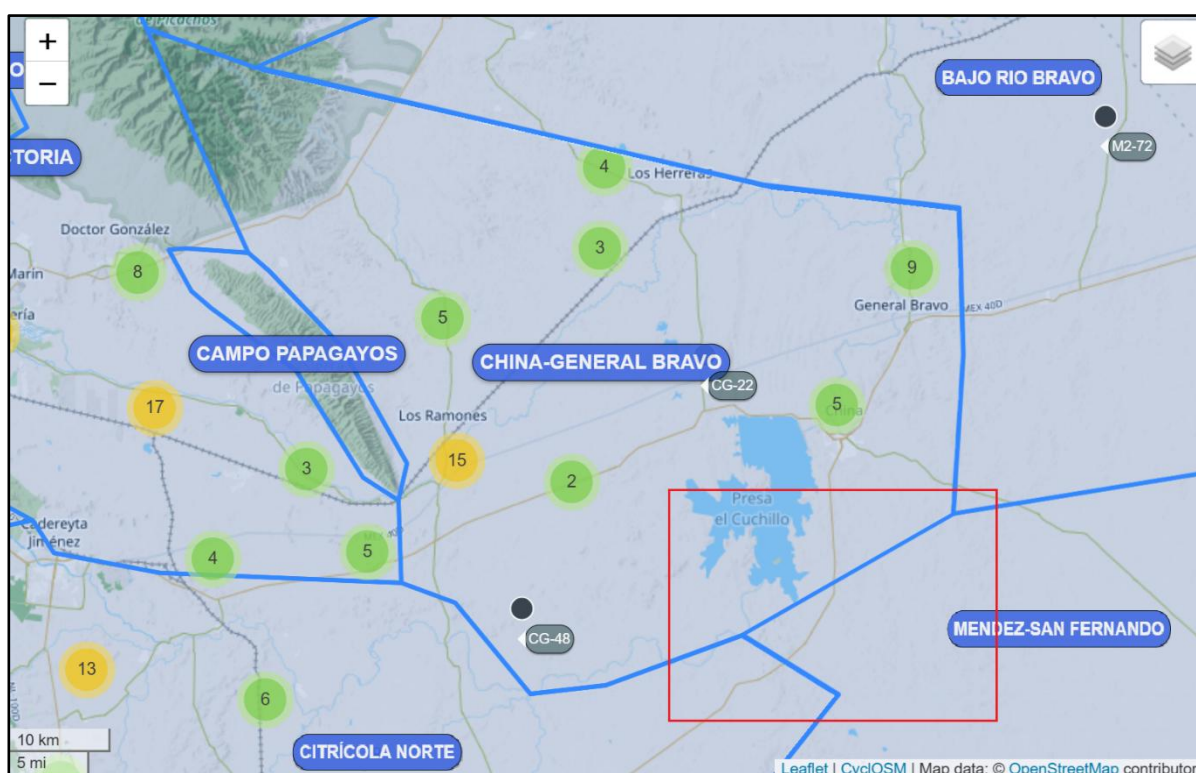


Figura 59. Búsqueda de puntos de medición piezométrica complementarios en acuíferos colindantes al sur y sureste del área de estudio (elaboración propia a partir del visor interactivo de CONAGUA, 2021).

Para la selección de los puntos utilizados en la elaboración de las cartas piezométricas se establecieron criterios espaciales, considerando únicamente aquellos localizados dentro del área de estudio y su entorno inmediato, priorizando los más cercanos al vaso de la presa y a las zonas donde previamente se identificaron afectaciones asociadas a las filtraciones.

Para ello, se definió un radio aproximado de 15 a 20 km alrededor del embalse, con el fin de mantener el análisis dentro del área de influencia hidrogeológica potencial de la presa y evitar la inclusión de puntos ubicados en localidades más alejadas cuyas lecturas piezométricas podrían introducir variaciones ajenas al sistema de flujo subterráneo relacionado con los procesos de filtración de la Presa El Cuchillo, debido a posibles diferencias en las condiciones hidrogeológicas regionales y en los gradientes hidráulicos locales. Esto podría generar distorsiones en la configuración de la superficie piezométrica, afectando la correcta interpretación de las direcciones de flujo subterráneo y del régimen hidráulico del área de estudio.

Como resultado de este proceso de selección (Figura 60), se eligieron nueve pozos piezométricos localizados dentro del radio definido. Adicionalmente, se incorporó un pozo ubicado ligeramente fuera del radio establecido (CG-48), debido a su posición estratégica al suroeste del embalse y su cercanía al cauce del río San Juan, el cual presenta una relación hidráulica directa con el sistema de la presa. La inclusión de este punto se consideró relevante para mejorar la interpretación del flujo subterráneo regional, particularmente en el sector aguas arriba de la cortina.

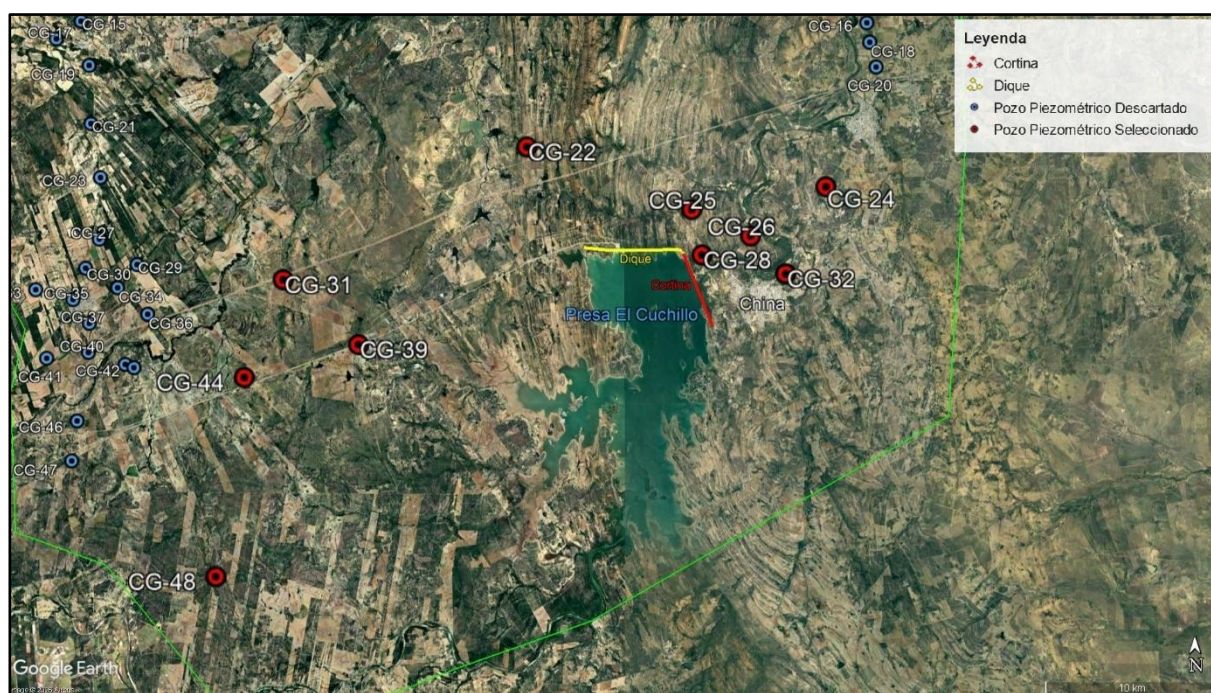


Figura 60. Localización de los pozos piezométricos seleccionados para la elaboración de las cartas piezométricas (elaboración propia a partir de imagen satelital de Google Earth Pro, 2021).

En total, para el análisis piezométrico se seleccionaron diez pozos piezométricos, cuyos datos corresponden a los años 2005, 2006, 2007 y 2009. La información utilizada se presenta de manera detallada en la Tabla 6, incluyendo ubicación, elevación del brocal, profundidad medida y niveles piezométricos registrados.

Pozos Seleccionados para Cartas Piezométricas								
Acuífero: <u>China-General Bravo (1913)</u> Organismo de Cuenca: <u>Río Bravo (VI)</u> Estado: <u>Nuevo León</u>								
N°	Pozo		Coordenadas		Elevación Brocal (msnm)	Año	Profundidad (m)	Elevación Nivel Piezométrico (msnm)
	Núm.	Nombre	Latitud	Longitud				
1	3870	CG-22	25.779444	-99.371389	186.00	2005	28.62	157.38
						2006	S/D	S/D
						2007	S/D	S/D
						2009	18.65	167.35
2	3872	CG-24	25.758889	-99.200556	148.00	2005	1.70	146.30
						2006	2.73	145.27
						2007	14.33	133.67
						2009	3.50	144.50
3	3873	CG-25	25.747222	-99.277222	150.00	2005	9.80	140.20
						2006	9.00	141.00
						2007	9.84	140.16
						2009	8.60	141.40
4	3874	CG-26	25.733611	-99.243611	140.00	2005	8.05	131.95
						2006	10.05	129.95
						2007	10.26	129.74
						2009	12.08	127.92
5	3876	CG-28	25.723889	-99.271389	147.00	2005	11.05	135.95
						2006	7.58	139.42
						2007	6.73	140.27
						2009	3.37	143.63
6	3879	CG-31	25.711111	-99.510556	191.00	2005	1.67	189.33
						2006	1.55	189.45
						2007	S/D	S/D
						2009	2.10	188.90
7	3880	CG-32	25.714167	-99.223611	138.00	2005	3.70	134.30
						2006	2.50	135.50
						2007	3.42	134.58
						2009	4.45	133.55
8	3887	CG-39	25.677778	-99.467500	201.00	2005	8.77	192.23
						2006	9.00	192.00
						2007	9.34	191.66
						2009	8.28	192.72
9	3891	CG-44	25.660833	-99.532778	203.00	2005	4.41	198.59
						2006	4.40	198.60
						2007	9.34	193.66
						2009	4.92	198.08
10	3894	CG-48	25.558333	-99.548889	221.00	2005	18.06	202.94
						2006	20.61	200.39
						2007	20.95	200.05
						2009	14.03	206.97

Tabla 6. Pozos seleccionados para la elaboración de las cartas piezométricas (elaboración propia, 2021).

4.3.3 Estimación de datos faltantes

Durante la revisión de la base de datos piezométrica se identificaron registros incompletos en dos de los diez pozos analizados. En particular, el pozo CG-22 no contaba con mediciones del nivel estático piezométrico correspondientes a los años 2006 y 2007, mientras que el pozo CG-31 carecía del registro del año 2007 (Tabla 6).

Con el fin de evitar discontinuidades en la serie temporal de datos y mantener la coherencia espacial del análisis, se procedió a estimar los valores faltantes mediante el método de interpolación espacial por Distancia Inversa Ponderada.

Interpolación espacial mediante IDW

El método de Distancia Inversa Ponderada (Inverse Distance Weighting, IDW) fue seleccionado por su amplia aplicación en estudios hidrogeológicos, su adecuación a la escala espacial del estudio, la proximidad entre los puntos analizados y la limitada densidad de datos disponibles. Asimismo, la interpolación por IDW ha sido ampliamente utilizada en disciplinas como la geología, la topografía, la ingeniería civil y las ciencias ambientales para la estimación de variables espaciales continuas, particularmente en contextos donde la información es escasa.

El método de Distancia Inversa Ponderada se fundamenta en el supuesto de que los valores de una variable presentan mayor similitud cuanto menor es la distancia que los separa; es decir, los elementos cercanos entre sí tienden a mostrar comportamientos más semejantes que aquellos que se encuentran más alejados. En consecuencia, el valor estimado en un punto sin medición se calcula como una combinación ponderada de los valores conocidos circundantes, asignando mayor peso a los puntos más próximos y reduciendo progresivamente su influencia conforme aumenta la distancia (de ahí el nombre de distancia inversa ponderada).

La expresión general del método de Ponderación Inversa de la Distancia (IDW) se presenta a continuación:

$$Z(x_0) = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{Z(x_i)}{d_i^p}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^p}}$$

Donde:

- $Z(x_0)$ = Valor estimado en el punto desconocido.
- $Z(x_i)$ = Valor medido en el punto de muestra x_i .
- d_i = Distancia entre el punto de muestra x_i y el punto a estimar x_0 .
- p = Potencia o parámetro de potencia.¹
- n = Número de puntos de muestra considerados en la estimación.

¹ El parámetro de potencia controla la tasa de disminución de la influencia de los puntos de muestra en función de la distancia:

- Si $p = 0$, no hay disminución con la distancia y cada ponderación es igual, por lo que la predicción será la media de todos los valores de la vecindad de búsqueda.
- A medida que p aumenta, las ponderaciones de los puntos distantes disminuyen progresivamente, por lo tanto, si el valor de p es muy alto, solo los puntos circundantes inmediatos influirán en la predicción.
- Cuando $p = 2$, el método se denomina interpolación por distancia inversa cuadrada ponderada, siendo este valor el más empleados en aplicaciones geoespaciales debido a que proporciona una capacidad para modelar una disminución progresiva y equilibrada de la influencia con la distancia.

Si bien no existe una justificación teórica única que establezca un valor óptimo universal para p , su selección suele evaluarse mediante análisis exploratorio y, cuando es posible, mediante procedimientos de validación cruzada que permiten examinar el efecto del parámetro en la precisión de las estimaciones.

Selección de pozos de influencia

Dado que los pozos CG-22 y CG-31 no contaban con medición directa del nivel estático piezométrico en los años señalados, estos fueron estimados a partir de los niveles registrados en los pozos circundantes más próximos.

La selección de los pozos de influencia se realizó mediante un análisis de proximidad espacial, considerando la distribución geométrica de los puntos y la ubicación del pozo a estimar (CG-22 y CG-31) dentro de un polígono definido mediante triangulación espacial con los pozos vecinos (Figura 61). Adicionalmente, se consideraron aspectos topográficos y un análisis preliminar del régimen de flujo subterráneo, elaborado a partir de la elevación del brocal y los niveles piezométricos disponibles en los pozos del acuífero. Esto permitió inferir de manera preliminar las posibles direcciones de flujo subterráneo y seleccionar aquellos pozos que, además de su cercanía espacial, se encontraban dentro de la posible zona de influencia hidráulica asociada a los pozos CG-31 y CG-22.

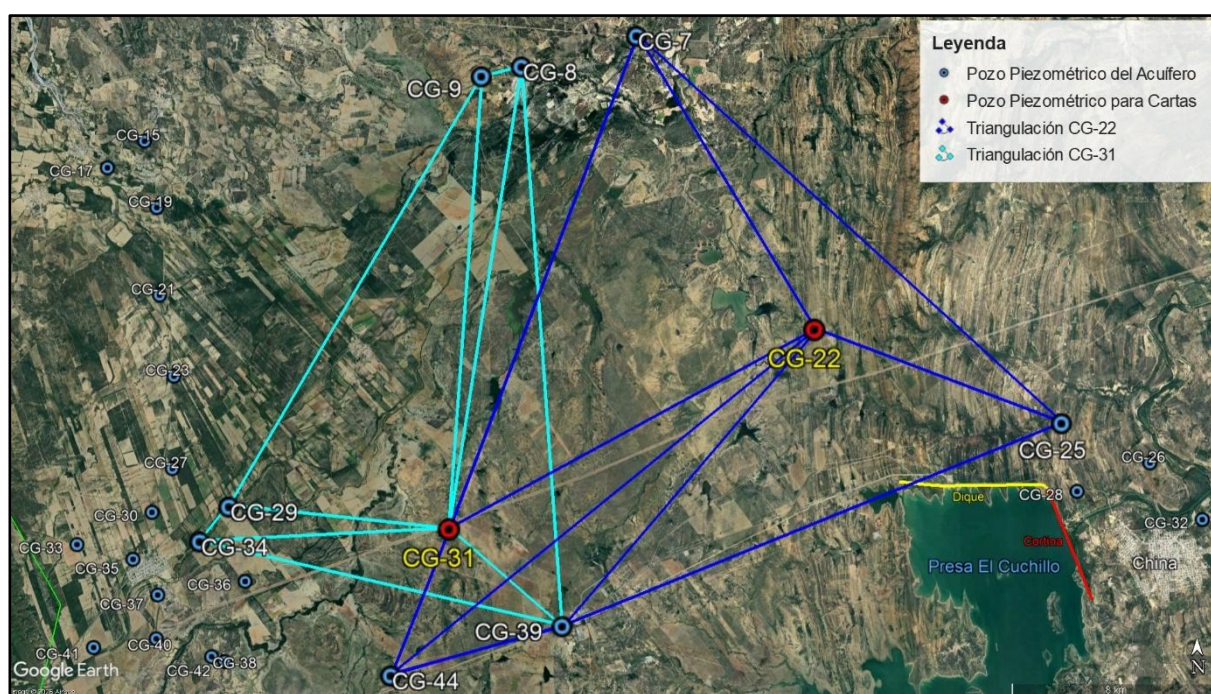


Figura 61. Selección de los pozos de influencia mediante triangulación para los pozos a estimar CG-22 y CG-31 (elaboración propia a partir de imagen satelital de Google Earth Pro, 2021).

Para el pozo CG-31 se seleccionaron cinco pozos circundantes con registros completos (Tabla 7). De igual manera, para el pozo CG-22 se utilizaron cinco pozos de referencia, incluyendo el CG-31 (Tabla 8).

Pozos Piezométricos de Influencia para el Pozo CG-31								
Acuífero: <u>China-General Bravo (1913)</u>								
Estado: <u>Nuevo León</u>								
N°	Pozo		Coordenadas		Elevación Brocal (msnm)	Año	Profundidad (m)	Elevación Nivel Piezométrico (msnm)
	Núm.	Nombre	Latitud	Longitud				
1	3856	CG-8	25.869444	-99.483056	165.00	2007	7.46	157.54
2	3857	CG-9	25.866111	-99.498333	184.00	2007	8.39	175.61
3	3877	CG-29	25.718611	-99.594444	200.50	2007	7.00	193.50
4	3882	CG-34	25.706667	-99.605556	200.50	2007	9.61	190.89
5	3887	CG-39	25.677778	-99.467500	201.00	2007	9.34	191.66

Tabla 7. Pozos seleccionados para la interpolación por IDW del pozo CG-31 (elaboración propia, 2021).

Pozos Piezométricos de Influencia para el Pozo CG-22								
Acuífero: <u>China-General Bravo (1913)</u>								
Estado: <u>Nuevo León</u>								
N°	Pozo		Coordenadas		Elevación Brocal (msnm)	Año	Profundidad (m)	Elevación Nivel Piezométrico (msnm)
	Núm.	Nombre	Latitud	Longitud				
1	3855	CG-7	25.880000	-99.439167	155.00	2006	9.30	145.70
						2007	9.50	145.50
2	3873	CG-25	25.747222	-99.277222	150.00	2006	9.00	141.00
						2007	9.84	140.16
3	3879	CG-31	25.711111	-99.510556	191.00	2006	1.55	189.45
						2007	S/D	S/D
4	3887	CG-39	25.677778	-99.467500	201.00	2006	9.00	192.00
						2007	9.34	191.66
5	3891	CG-44	25.660833	-99.532778	203.00	2006	4.40	198.60
						2007	9.34	193.66

Tabla 8. Pozos seleccionados para la interpolación por IDW del pozo CG-22 (elaboración propia, 2021).

Debido a que el pozo CG-31 presentaba únicamente un registro faltante y, adicionalmente, constituye uno de los pozos de influencia considerados para la interpolación del pozo CG-22, se decidió estimar primero su nivel piezométrico. De esta manera, fue posible disponer de una serie completa para el CG-31 antes de incorporarlo al cálculo posterior correspondiente al pozo CG-22.

Determinación de distancias mediante la fórmula de Haversine

Una vez definidos los pozos de influencia para cada punto a estimar, fue necesario calcular las distancias lineales entre estos y el pozo de interés, ya que dichas distancias constituyen el parámetro fundamental para la asignación de pesos en el método IDW.

Dado que las ubicaciones de los pozos se encontraban registradas mediante coordenadas geográficas en grados decimales (latitud y longitud), se procedió al cálculo de las distancias empleando la fórmula de Haversine, la cual permite estimar la distancia geodésica entre dos puntos, a partir de sus coordenadas geográficas, considerando la curvatura terrestre bajo un modelo esférico, garantizando así una estimación más precisa de las distancias reales.

La fórmula de Haversine se expresa como:

$$d = 2 \cdot R \cdot \arcsin \left(\sqrt{\sin^2 \left(\frac{\Delta \varphi}{2} \right) + \cos(\varphi_1) \cdot \cos(\varphi_2) \cdot \sin^2 \left(\frac{\Delta \lambda}{2} \right)} \right)$$

Donde:

- ***d*** = Distancia entre dos puntos a lo largo del círculo máximo de la esfera.
- ***R*** = Radio de la esfera (para la Tierra se adopta un radio medio de 6,371 km).²
- ***φ₁, φ₂*** = Latitudes de los puntos 1 y 2, expresadas en radianes.
- ***Δφ*** = Diferencia de latitudes (*φ₂* - *φ₁*).
- ***Δλ*** = Diferencia de longitudes (*λ₂* - *λ₁*).

² El radio terrestre no es constante debido a la forma ligeramente elipsoidal del planeta, variando aproximadamente de 6,356.78 km en los polos a 6,378.14 km en el ecuador. No obstante, para el cálculo de distancias mediante la fórmula de Haversine se adopta convencionalmente un radio medio terrestre aproximado de 6,371 km, ya que dicha expresión se fundamenta en un modelo esférico y requiere asumir un radio constante que represente una aproximación promedio de la Tierra.

Si bien esta formulación constituye una simplificación geométrica, las variaciones reales en la curvatura superficial (dependientes de la latitud y la dirección considerada) pueden introducir diferencias del orden de hasta 0.5 % en distancias de gran extensión. Sin embargo, dado que las distancias analizadas en el presente estudio son menores a 25 km, el error asociado a esta aproximación es despreciable, por lo que el uso del modelo esférico se considera adecuado para los fines de la interpolación.

Las distancias entre los pozos se calcularon empleando la fórmula de Haversine aplicada mediante hojas de cálculo en Microsoft Excel. Esta implementación permitió garantizar la precisión numérica de los cálculos y estandarizar el procedimiento, asegurando así una metodología sistemática, replicable y consistente.

Inicialmente, las coordenadas expresadas en grados decimales fueron convertidas a radianes mediante la expresión siguiente:

$$lat = lat \cdot \frac{\pi}{180}$$

$$lon = lon \cdot \frac{\pi}{180}$$

En las Tablas 9 y 10 se muestran la conversión de las coordenadas geográficas de grados decimales a radianes para los pozos CG-31 y CG-22, así como sus respectivos pozos de influencia.

Conversión de Coordenadas Geográficas para el Pozo CG-31									
Acuífero: <u>China-General Bravo (1913)</u>									
Estado: <u>Nuevo León</u>									
Punto		Latitud (°)		Longitud (°)		Latitud (rad)		Longitud (rad)	
1	2	Pto. 1	Pto. 2	Pto. 1	Pto. 2	Pto. 1 (φ_1)	Pto. 2 (φ_2)	Pto. 1 (λ_1)	Pto. 2 (λ_2)
CG-31	CG-8	25.711111	25.869444	-99.510556	-99.483056	0.448744	0.451507	-1.736787	-1.736307
	CG-9		25.866111		-99.498333		0.451449		-1.736574
	CG-29		25.718611		-99.594444		0.448874		-1.738251
	CG-34		25.706667		-99.605556		0.448666		-1.738445
	CG-39		25.677778		-99.467500		0.448162		-1.736035

Tabla 9. Conversión de coordenadas del pozo CG-31 y los pozos de influencia (elaboración propia, 2021).

Conversión de Coordenadas Geográficas para el Pozo CG-22									
Acuífero: <u>China-General Bravo (1913)</u>									
Estado: <u>Nuevo León</u>									
Punto		Latitud (°)		Longitud (°)		Latitud (rad)		Longitud (rad)	
1	2	Pto. 1	Pto. 2	Pto. 1	Pto. 2	Pto. 1 (φ_1)	Pto. 2 (φ_2)	Pto. 1 (λ_1)	Pto. 2 (λ_2)
CG-22	CG-7	25.779444	25.880000	-99.371389	-99.439167	0.449936	0.451691	-1.734358	-1.735541
	CG-25		25.747222		-99.277222		0.449374		-1.732714
	CG-31		25.711111		-99.510556		0.448744		-1.736787
	CG-39		25.677778		-99.467500		0.448162		-1.736035
	CG-44		25.660833		-99.532778		0.447866		-1.737175

Tabla 10. Conversión de coordenadas del pozo CG-22 y los pozos de influencia (elaboración propia, 2021).

Posteriormente, en las Tablas 11 y 12 se presenta el procedimiento aplicado para el cálculo de distancias mediante la ecuación de Haversine. En dichas tablas se incorporan las coordenadas de latitud y longitud en radianes junto con sus diferencias angulares, el radio medio terrestre adoptado (6,371 km) y la distancia resultante.

Cálculo de las Distancias entre el Pozo CG-31 y los Pozos de Influencia									
Acuífero: <u>China-General Bravo (1913)</u>									
Estado: <u>Nuevo León</u>									
Punto		Latitud (rad)		Longitud (rad)		$\Delta\phi$	$\Delta\lambda$	R (Km)	d (Km)
1	2	ϕ_1	ϕ_2	λ_1	λ_2				
CG-31	CG-8	0.448744	0.451507	-1.736787	-1.736307	0.002763	0.000480	6,371	17.8198
	CG-9		0.451449		-1.736574	0.002705	0.000213		17.2786
	CG-29		0.448874		-1.738251	0.000131	-0.001464		8.4454
	CG-34		0.448666		-1.738445	-0.000078	-0.001658		9.5307
	CG-39		0.448162		-1.736035	-0.000582	0.000751		5.6877

Tabla 11. Cálculo de distancias entre el pozo CG-31 y los pozos de influencia (elaboración propia, 2021).

Cálculo de las Distancias entre el Pozo CG-22 y los Pozos de Influencia									
Acuífero: <u>China-General Bravo (1913)</u>									
Estado: <u>Nuevo León</u>									
Punto		Latitud (rad)		Longitud (rad)		$\Delta\phi$	$\Delta\lambda$	R (Km)	d (Km)
1	2	ϕ_1	ϕ_2	λ_1	λ_2				
CG-22	CG-7	0.449936	0.451691	-1.734358	-1.735541	0.001755	-0.001183	6,371	13.0782
	CG-25		0.449374		-1.732714	-0.000562	0.001644		10.0878
	CG-31		0.448744		-1.736787	-0.001193	-0.002429		15.8751
	CG-39		0.448162		-1.736035	-0.001774	-0.001677		14.8488
	CG-44		0.447866		-1.737175	-0.002070	-0.002817		20.8648

Tabla 12. Cálculo de distancias entre el pozo CG-22 y los pozos de influencia (elaboración propia, 2021).

La fórmula fue implementada mediante referencias relativas, permitiendo automatizar su aplicación y reducir posibles errores asociados al procesamiento manual. Previamente a su aplicación generalizada, la formulación fue verificada mediante cálculos manuales, cotejando los resultados obtenidos con los de las hojas de cálculo, con el fin de asegurar la correcta implementación del procedimiento.

Estimación de niveles piezométricos faltantes

Una vez calculadas las distancias entre los pozos de influencia y los pozos a estimar, se estructuró la matriz necesaria para la implementación del método de interpolación por Distancia Inversa Ponderada (IDW), de acuerdo con la siguiente expresión:

$$Z(x_0) = \frac{\sum \frac{Z(x_i)}{d_i^p}}{\sum \frac{1}{d_i^p}}$$

Donde:

- $Z(x_0)$ = Nivel piezométrico estimado del pozo sin registro
- $Z(x_i)$ = Niveles piezométricos registrados en los pozos de influencia.
- d_i = Distancia entre el pozo sin registro y cada pozo de influencia.
- p = Potencia o parámetro de potencia, adoptado con un valor de 2.

En las Tablas 13, 14 y 15 se presentan los cálculos realizados para la estimación de los niveles piezométricos faltantes correspondientes al pozo CG-31 para el año 2007 y al pozo CG-22 para los años 2006 y 2007, respectivamente.

Estimación del Nivel Piezométrico para el Pozo CG-31							
Acuífero: <u>China-General Bravo (1913)</u>							
Estado: <u>Nuevo León</u>							
Año: <u>2007</u>							
Nº	Pozo de Influencia	Nivel Estático Piezométrico [Z(x _i)] (msnm)	Distancia [d _i] (m)	Parámetro de Potencia [p]	d _i ^p	$\frac{1}{d_i^p}$	$\frac{Z(x_i)}{d_i^p}$
1	CG-8	157.54	17,819.80	2	317,545,272.04	0.00000000315	0.00000049612
2	CG-9	175.61	17,278.60	2	298,550,017.96	0.00000000335	0.00000058821
3	CG-29	193.50	8,445.40	2	71,324,781.16	0.00000001402	0.00000271294
4	CG-34	190.89	9,530.60	2	90,832,336.36	0.00000001101	0.00000210156
5	CG-39	191.66	5,687.70	2	32,349,931.29	0.00000003091	0.00000592459
						Σ =	0.00000006244
							0.00001182342
						Nivel Piezométrico Estimado [Z(x ₀)] =	
						189.36 msnm	

Tabla 13. Estimación del nivel piezométrico del pozo CG-31 para el año 2007 mediante interpolación IDW (elaboración propia, 2021).

Estimación del Nivel Piezométrico para el Pozo CG-22							
Acuífero: <u>China-General Bravo (1913)</u>							
Estado: <u>Nuevo León</u>							
Año: <u>2006</u>							
N°	Pozo de Influencia	Nivel Estático Piezométrico [Z(x _i)] (msnm)	Distancia [d _i] (m)	Parámetro de Potencia [p]	d _i ^p	$\frac{1}{d_i^p}$	$\frac{Z(x_i)}{d_i^p}$
1	CG-7	145.70	13,078.20	2	171,039,315.24	0.00000000585	0.00000085185
2	CG-25	141.00	10,087.80	2	101,763,708.84	0.00000000983	0.00000138556
3	CG-31	189.45	15,875.10	2	252,018,800.01	0.00000000397	0.00000075173
4	CG-39	192.00	14,848.80	2	220,486,861.44	0.00000000454	0.00000087080
5	CG-44	198.60	20,864.80	2	435,339,879.04	0.00000000230	0.00000045620
$\Sigma =$						0.00000002647	0.00000431614
Nivel Piezométrico Estimado [Z(x ₀)] =						163.03 msnm	

Tabla 14. Estimación del nivel piezométrico del pozo CG-22 para el año 2006 mediante interpolación IDW (elaboración propia, 2021).

Estimación del Nivel Piezométrico para el Pozo CG-22							
Acuífero: <u>China-General Bravo (1913)</u>							
Estado: <u>Nuevo León</u>							
Año: <u>2007</u>							
N°	Pozo de Influencia	Nivel Estático Piezométrico [Z(x _i)] (msnm)	Distancia [d _i] (m)	Parámetro de Potencia [p]	d _i ^p	$\frac{1}{d_i^p}$	$\frac{Z(x_i)}{d_i^p}$
1	CG-7	145.50	13,078.20	2	171,039,315.24	0.00000000585	0.00000085068
2	CG-25	140.16	10,087.80	2	101,763,708.84	0.00000000983	0.00000137731
3	CG-31	189.36	15,875.10	2	252,018,800.01	0.00000000397	0.00000075137
4	CG-39	191.66	14,848.80	2	220,486,861.44	0.00000000454	0.00000086926
5	CG-44	193.66	20,864.80	2	435,339,879.04	0.00000000230	0.00000044485
$\Sigma =$						0.00000002647	0.00000429347
Nivel Piezométrico Estimado [Z(x ₀)] =						162.18 msnm	

Tabla 15. Estimación del nivel piezométrico del pozo CG-22 para el año 2007 mediante interpolación IDW (elaboración propia, 2021).

Si bien la literatura especializada señala que el valor $p=2$ representa uno de los parámetros más utilizados en aplicaciones hidrogeológicas y geoespaciales del método

IDW, en el presente estudio se realizó adicionalmente una evaluación exploratoria para verificar su adecuación a las condiciones particulares del área de estudio.

Para ello, se utilizaron registros históricos correspondientes a años con información piezométrica completa en los pozos CG-31 y CG-22, realizando estimaciones iterativas del parámetro p hasta reproducir de manera aproximada los niveles piezométricos medidos en dichos periodos.

En el caso del pozo CG-31, se obtuvieron valores de $p=2.02$ para 2005, $p=1.83$ para 2006 y $p=1.82$ para 2009, con un valor promedio de $p=1.89$. Por su parte, para el pozo CG-22 se obtuvieron valores de $p=3.12$ para 2005 y $p=1.22$ para 2009, obteniéndose un promedio de $p=2.17$.

Aunque se observa cierta variabilidad entre los valores calculados, los resultados obtenidos presentan una tendencia general cercana al valor $p=2$, ampliamente recomendado en la literatura para modelar una disminución progresiva y equilibrada de la influencia espacial con la distancia. Con base en ello, y considerando la escala del estudio, la distribución de los datos disponibles y el carácter regional del análisis hidrogeológico, se adoptó un valor de $p=2$ para la estimación de los niveles piezométricos faltantes.

Los niveles piezométricos obtenidos mediante interpolación permitieron complementar los registros incompletos de la base de datos utilizada para el análisis hidrogeológico, manteniendo la continuidad espacial y temporal necesaria para la elaboración de las cartas piezométricas.

Dado que el número de datos estimados representa un porcentaje reducido del total de registros piezométricos analizados, se considera que su incorporación no modifica de manera significativa la tendencia regional del régimen de flujo subterráneo interpretado en el presente estudio.

Asimismo, los valores obtenidos deben considerarse estimaciones indirectas, válidas a la escala espacial del análisis y sujetas a posibles variaciones inherentes al

comportamiento natural del acuífero y a la disponibilidad limitada de información piezométrica. No obstante, el procedimiento aplicado permitió integrar de manera consistente los datos faltantes, proporcionando una base metodológica homogénea para la elaboración e interpretación de las cartas piezométricas desarrolladas en el apartado siguiente.

4.3.4 Elaboración de cartas piezométricas

Con el propósito de analizar espacialmente el régimen de flujo subterráneo en el área de influencia de la Presa El Cuchillo, se elaboraron cartas piezométricas correspondientes a los años 2005, 2006, 2007 y 2009, utilizando información piezométrica histórica obtenida de los pozos seleccionados en el apartado anterior. Estas cartas permitieron representar la distribución espacial de los niveles piezométricos y establecer, de manera preliminar, las posibles direcciones del flujo subterráneo en el área de estudio.

La elaboración cartográfica se realizó mediante el software ArcMap versión 10.4.1, empleando el sistema de coordenadas proyectadas “WGS 1984 UTM Zone 14N”, con el fin de mantener coherencia espacial entre los distintos insumos utilizados y garantizar la correcta representación geográfica de la información.

Integración y preparación de datos espaciales

Como insumo principal se utilizó una base de datos digital en formato “.CSV”, integrada a partir de la información piezométrica recopilada y procesada previamente. Esta base de datos incluyó las coordenadas UTM de los pozos piezométricos, número de identificación de cada pozo, elevación del brocal, profundidad al nivel del agua y nivel piezométrico (en msnm), incorporando tanto los registros medidos directamente como los valores estimados mediante interpolación IDW.

El nivel piezométrico utilizado para la elaboración de las cartas se determinó mediante la diferencia entre la elevación del brocal y la profundidad medida al nivel del agua:

$$\textit{Nivel piezométrico} = \textit{Elevación del brocal} - \textit{Profundidad al nivel del agua}$$

Para cada periodo analizado se incorporó además una imagen satelital de alta resolución obtenida de Google Earth Pro, la cual fue georreferenciada dentro del entorno SIG mediante puntos de control espacial. Estas imágenes funcionaron como base cartográfica de referencia, permitiendo visualizar la ubicación de los pozos y de los principales elementos hidráulicos de la presa, particularmente la cortina y el dique.

Posteriormente, la información contenida en los archivos “.CSV” fue importada al entorno SIG y convertida en capas vectoriales de puntos mediante la generación de shapefiles, permitiendo representar espacialmente los pozos piezométricos sobre las imágenes georreferenciadas y verificar la correcta ubicación de cada uno de ellos dentro del área de estudio.

Generación de la superficie piezométrica

Una vez integrados los datos espaciales, se procedió a la generación de superficies piezométricas continuas mediante el método de interpolación geoestadística Kriging. Este método fue seleccionado debido a su amplia aplicación en estudios hidrogeológicos y a su capacidad para modelar la continuidad espacial de variables regionalizadas, permitiendo representar de manera más uniforme la distribución del potencial hidráulico subterráneo.

La interpolación se realizó de forma independiente para cada uno de los años analizados (2005, 2006, 2007 y 2009), utilizando como variable de entrada los niveles piezométricos expresados en msnm correspondientes a los diez pozos seleccionados.

A partir de las superficies interpoladas se generaron curvas piezométricas o isopiezas mediante la herramienta “Contour” del módulo “Surface” de ArcMap. Las curvas fueron generadas automáticamente empleando un intervalo vertical de 2 metros, considerado adecuado para representar las variaciones espaciales del nivel piezométrico dentro del área de estudio, manteniendo un equilibrio entre el nivel de detalle y la legibilidad cartográfica.

Posteriormente, las superficies interpoladas y las curvas piezométricas obtenidas fueron recortadas al área de interés, con el fin de concentrar el análisis en la zona de influencia hidrogeológica asociada a la Presa El Cuchillo.

Elaboración de curvas piezométricas y líneas de flujo

Las curvas piezométricas generadas representan líneas equipotenciales que unen puntos con igual carga hidráulica, permitiendo visualizar la configuración espacial del nivel freático y las variaciones del potencial hidráulico dentro del área de estudio.

Con base en la disposición espacial de estas curvas, se procedió a la elaboración de líneas de flujo subterráneo, las cuales fueron trazadas manualmente siguiendo criterios clásicos de interpretación hidrogeológica. Para ello, las curvas piezométricas fueron exportadas al software AutoCAD, donde se realizó el trazado de las líneas de flujo considerando la perpendicularidad respecto a las isopiezas y la continuidad geométrica del sistema hidráulico.

Una vez generadas, las líneas de flujo fueron incorporadas nuevamente al entorno SIG, conservando su referencia espacial original, lo que permitió integrarlas a las cartas piezométricas finales.

Cabe señalar que las líneas de flujo representadas constituyen una interpretación gráfica preliminar del comportamiento regional del agua subterránea, elaborada con fines de análisis hidrogeológico cualitativo.

Integración cartográfica y representación final

Finalmente, se realizó la integración de todos los elementos cartográficos necesarios para la representación final de las cartas piezométricas, incluyendo curvas piezométricas, líneas de flujo, ubicación de pozos, simbología temática, escala gráfica, orientación geográfica y elementos de referencia asociados a la infraestructura hidráulica de la presa.

Como resultado, se obtuvieron cuatro cartas piezométricas correspondientes a los años 2005, 2006, 2007 y 2009, las cuales constituyen la base para el análisis espacial e interpretación del régimen de flujo subterráneo desarrollado en el capítulo de resultados.

4.4 Balance hídrico del embalse de la Presa El Cuchillo

El análisis hidrogeológico desarrollado anteriormente permitió identificar la posible interacción hidráulica entre el embalse de la Presa El Cuchillo y el sistema acuífero regional, así como la existencia de zonas donde potencialmente se presentan procesos de filtración. No obstante, además del análisis piezométrico y espacial, resulta necesario evaluar el comportamiento del embalse desde una perspectiva volumétrica, con el fin de estimar la magnitud de las pérdidas de agua asociadas a dichos procesos.

Con este propósito, se desarrolló un balance hídrico del embalse correspondiente al año 2021, integrando las principales entradas, salidas y variaciones de almacenamiento registradas durante dicho periodo. Este procedimiento permite analizar la relación existente entre los volúmenes de agua que ingresan al vaso de almacenamiento, los que permanecen almacenados y aquellos que abandonan el sistema.

La confiabilidad del balance hídrico consiste en verificar la correspondencia entre los registros operativos y el comportamiento hidráulico esperado del embalse, permitiendo identificar posibles discrepancias asociadas a pérdidas no cuantificadas, particularmente aquellas vinculadas con filtraciones. De esta manera, el balance constituye una herramienta complementaria al análisis hidrogeológico previamente realizado, proporcionando una evaluación integral del comportamiento hidráulico del sistema durante el periodo analizado.

Para el desarrollo del análisis se empleó información hidrometeorológica, hidrométrica y operativa obtenida mediante la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), así como registros asociados al almacenamiento y aprovechamiento del embalse.

4.4.1 Planteamiento general del balance hídrico

El balance hídrico del embalse fue desarrollado bajo el principio de conservación de masa, estableciendo que la variación del volumen almacenado durante un intervalo de tiempo determinado es igual a la diferencia entre el volumen que ingresa y el que sale.

De manera general, el balance hídrico aplicado al embalse considera como entradas el escurrimiento superficial aportado por la cuenca tributaria y la precipitación directa sobre el vaso de almacenamiento. Por otra parte, las salidas contempladas

corresponden a la evaporación superficial, las extracciones destinadas al abastecimiento de agua potable y para riego agrícola, y las pérdidas mediante operaciones extraordinarias de trasvase y procesos asociados a las filtraciones.

No se incorporó un término independiente correspondiente a gasto ecológico, debido a que no se identificaron registros específicos de liberaciones ambientales controladas para el periodo de análisis. Asimismo, las descargas operativas reportadas para la presa durante 2021 se encuentran representadas mediante los volúmenes considerados en los apartados de trasvase, riego y abastecimiento.

Con base en lo anterior, la variación del almacenamiento fue determinada mediante dos procedimientos independientes. El primero corresponde a la **estimación obtenida mediante el balance hídrico**, calculada a partir de la integración de todas las entradas y salidas consideradas en el sistema. El segundo corresponde a la **variación observada del almacenamiento**, determinada directamente a partir de los registros oficiales de almacenamiento del embalse reportados por la CONAGUA. La comparación entre ambas estimaciones permitió evaluar la consistencia del balance hídrico desarrollado e identificar la existencia de volúmenes no explicados por las componentes inicialmente consideradas.

La variación del almacenamiento obtenida mediante el balance hídrico se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$\Delta S_{BH} = (E_s + P_p) - (E_v + E_a + I_r + T_r + I_f)$$

Donde:

- ΔS_{BH} = Variación del almacenamiento estimada mediante el balance hídrico.
- E_s = Escorrentía superficial de entrada.
- P_p = Precipitación directa sobre el embalse.
- E_v = Pérdidas por evaporación.
- E_a = Extracciones para abastecimiento de agua potable.
- I_r = Extracción para riego.
- T_r = Extracciones mediante operaciones de trasvase.
- I_f = Pérdidas por filtración.

Por otra parte, la variación del almacenamiento observada en el embalse se determinó a partir de la diferencia entre el volumen almacenado al inicio y al final del periodo de análisis, considerando los registros correspondientes al 1 de enero y al 31 de diciembre de 2021, reportados por la CONAGUA, mediante la siguiente expresión:

$$\Delta S_{obs} = S_f - S_i$$

Donde:

- ΔS_{obs} = Variación del almacenamiento observada en los registros.
- S_f = Volumen almacenado final.
- S_i = Volumen almacenado inicial.

Para el presente estudio se adoptó una escala temporal mensual, debido a que la mayor parte de las variables hidrometeorológicas y operativas disponibles se encontraban reportadas bajo dicha periodicidad. Posteriormente, los resultados mensuales fueron integrados para obtener el comportamiento acumulado anual del embalse. Finalmente, la variación del almacenamiento obtenida mediante el balance hídrico (ΔS_{BH}) fue comparada con la variación observada (ΔS_{obs}) para evaluar la capacidad del balance de reproducir el comportamiento real del embalse durante el año 2021.

4.4.2 Recopilación de información

Una vez definidas las variables que integran el balance hídrico, se procedió a la recopilación de la información necesaria para cuantificar cada uno de sus componentes durante el año 2021. En los apartados siguientes se describen las fuentes consultadas y las características de la información utilizada para cada variable.

Escurrimiento superficial

La información de escurrimiento se obtuvo mediante el portal del Sistema de Información Hidrológica (SIH) de la CONAGUA, específicamente en el apartado de estaciones hidrométricas. Para este estudio se seleccionó la estación hidrométrica Las Enramadas (clave LERNL), ubicada en el municipio de Los Ramones, Nuevo León.

La selección de esta estación obedeció a su ubicación estratégica aguas arriba del embalse de la Presa El Cuchillo, permitiendo registrar el escurrimiento superficial que

efectivamente ingresa al vaso de almacenamiento. Asimismo, la estación se localiza aguas abajo de la confluencia de los ríos San Juan, Pilon y Tlahualilo, por lo que sus registros representan de manera adecuada la aportación conjunta de los principales afluentes que alimentan la presa.

Los registros obtenidos corresponden a gastos medios diarios expresados en metros cúbicos por segundo (m^3/s) para el año 2021. Debido a que el balance hídrico se realizó a escala mensual, los valores diarios fueron agrupados por mes (Tabla 16), obteniendo así registros mensuales representativos de los escurrimientos que ingresaron al embalse durante el periodo de análisis.

Gastos Medios Mensuales Registrados												
Estación hidrométrica: <u>Las Enramadas</u>												
Clave: <u>LERNL</u>												
Ubicación: <u>Los Ramones, Nuevo León</u>												
Año: <u>2021</u>												
Concepto	Mes											
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Suma de Gastos Medios Diarios (m^3/s)	133.48	93.37	74.36	58.24	65.56	834.17	885.13	451.09	231.33	311.42	329.11	129.99

Tabla 16. Gastos medios mensuales registrados en la estación hidrométrica Las Enramadas durante el año 2021 (elaboración propia, 2022).

Precipitación y evaporación

Los datos de precipitación y evaporación fueron obtenidos a través del Servicio Meteorológico Nacional (SMN), organismo dependiente de la CONAGUA, mediante el sistema de Información Estadística Climatológica. Para este análisis se utilizó la información registrada en la estación climatológica El Cuchillo (clave 19016), localizada en el municipio de China, Nuevo León, por ser la estación más cercana al área de estudio y contar con registros continuos para el periodo analizado.

La información consultada corresponde al informe de climatología diaria, el cual contiene registros totales de precipitación y evaporación expresados en milímetros (mm) de lámina de agua, además de otras variables climatológicas. Para el presente estudio únicamente se consideraron los registros correspondientes al año 2021. Debido a que el balance hídrico fue desarrollado a escala mensual, las mediciones diarias de

precipitación y evaporación fueron agrupadas y acumuladas por mes (Tabla 17 y 18) para su posterior procesamiento e incorporación al análisis.

Precipitación Acumulada Mensual Registrada												
Estación climatológica: <u>El Cuchillo</u>												
Clave: <u>1901</u>												
Ubicación: <u>China, Nuevo León</u>												
Año: <u>2021</u>												
Concepto	Mes											
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Precipitación Acumulada (mm)	15.32	5.10	2.51	78.00	72.01	46.30	152.74	70.60	0.02	180.00	81.50	20.00

Tabla 17. Precipitación acumulada mensual registrada en la estación climatológica El Cuchillo durante el año 2021 (elaboración propia, 2022).

Evaporación Acumulada Mensual Registrada												
Estación climatológica: <u>El Cuchillo</u>												
Clave: <u>1901</u>												
Ubicación: <u>China, Nuevo León</u>												
Año: <u>2021</u>												
Concepto	Mes											
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Evaporación Acumulada (mm)	90.17	85.05	187.35	194.46	214.29	210.74	192.30	239.72	207.46	139.20	91.85	82.50

Tabla 18. Evaporación acumulada mensual registrada en la estación climatológica El Cuchillo durante el año 2021 (elaboración propia, 2022).

Extracción para abastecimiento de agua potable

La información relacionada con el abastecimiento de agua potable fue obtenida a partir de documentos técnicos e información oficial de la CONAGUA y de Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey.

Se identificó que durante el año 2021 la principal extracción de agua destinada al abastecimiento público se realizaba mediante el Acueducto El Cuchillo-Monterrey, infraestructura diseñada para conducir agua desde la presa hacia la zona metropolitana de Monterrey. De acuerdo con la información consultada, dicho sistema operaba con una capacidad aproximada de 5 m³/s.

Adicionalmente, mediante la consulta del Sistema Nacional de Información del Agua (SINA) se identificó la existencia del sistema China-Los Aldama, el cual registra una capacidad de conducción de 114.09 l/s, equivalente a 0.11409 m³/s. Debido a que

ambos sistemas extraen agua directamente del embalse para fines de abastecimiento, fueron considerados dentro de las variables de salida del balance hídrico.

Extracción para riego

La información correspondiente al uso agrícola se obtuvo mediante los informes estadísticos de la CONAGUA denominados *Superficies regadas y volúmenes distribuidos por distrito de riego 1998-2024*.

Se identificó que para el año agrícola 2021, la Presa El Cuchillo suministró al Distrito de Riego 031 Las Lajas (localizado en el estado de Nuevo León) un volumen bruto anual distribuido para riego de 9,891,000 m³, el cual fue incorporado como parte de las salidas del sistema consideradas en el balance hídrico.

Trasvase

Como parte de las salidas extraordinarias consideradas en el balance hídrico, se incorporó el volumen de agua transferido desde la Presa El Cuchillo-Solidaridad hacia la Presa Marte R. Gómez, ubicada en el estado de Tamaulipas, durante el año 2021.

De acuerdo con la Comisión Nacional del Agua, esta operación fue implementada como una medida de seguridad hidráulica debido a los elevados niveles de almacenamiento registrados en la presa después de las lluvias extraordinarias asociadas a la tormenta tropical Hanna, ocurrida durante julio de 2020. Como consecuencia de dichos eventos hidrometeorológicos, el embalse alcanzó niveles cercanos a su capacidad máxima de operación, por lo que el Comité Nacional de Grandes Presas autorizó la realización de maniobras de extracción controlada con el objetivo de disminuir la presión ejercida sobre las estructuras hidráulicas y reducir posibles riesgos operativos.

La información utilizada fue obtenida del comunicado oficial emitido por la CONAGUA el 24 de enero de 2021, denominado *“El trasvase de la presa El Cuchillo-Solidaridad no compromete el abasto de agua para la zona metropolitana de Monterrey”*, en el cual se reporta un volumen total de trasvase de aproximadamente 450 millones de metros cúbicos y que las maniobras se realizaron garantizando la disponibilidad de agua para abastecimiento público de la Zona Metropolitana de Monterrey.

Filtraciones

Los valores de filtración fueron obtenidos a partir de un informe técnico elaborado por la Subdirección General Técnica de la CONAGUA a través de la Gerencia de Aguas Superficiales e Ingeniería de Ríos (Figura 62). El informe presenta valores estadísticos mensuales y anuales de filtración correspondiente a la Presa El Cuchillo-Solidaridad (clave 104ECU) para diversos años, incluyendo el periodo de estudio (2021).

Debido a que dichos valores constituyen estimaciones oficiales de las pérdidas por filtración asociadas al embalse, fueron incorporados inicialmente dentro del balance hídrico con el propósito de evaluar posteriormente su consistencia respecto a la variación observada en el almacenamiento y compararlos con los resultados obtenidos mediante el análisis hidrogeológico desarrollado en la presente investigación.

COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA GERENCIA DE AGUAS SUPERFICIALES E INGENIERÍA DE RÍOS													
NOMBRE OFICIAL:				ALIAS:				CLAVE:					
EL CUCHILLO								104ECU					
CORRIENTES ALIMENTADORAS:								REGIÓN:					
CUENCA PRINCIPAL:				RIO SAN JUAN, ACUEDUCTO DULZURA, ACUEDUCTO DULZURA, ACUEDUCTO DULZURA				BRAVO					
								ESTADO:					
								NUEVO LEON					
VALORES ESTADÍSTICOS DE: FILTRACIONES (10³m³)													
ANO	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE	ANUAL
2018	66.96	60.48	66.96	64.80	66.96	64.80	66.96	66.96	64.80	66.96	64.80	66.96	788.40
2019	66.96	60.48	66.96	64.80	66.96	64.80	66.96	66.96	64.80	66.96	64.80	66.96	788.40
2020	66.96	62.64	66.96	64.80	66.96	64.80	66.96	66.96	64.80	66.96	64.80	66.96	790.56
2021	66.96	60.48	66.96	64.80	66.96	64.80	66.96	66.96	64.80	66.96	64.80	66.96	788.40
2022	66.96	60.48	66.96	64.80	66.96								
PROM	66.96	60.91	66.96	64.80	66.96	51.84	53.57	53.57	51.84	53.57	51.84	53.57	631.15
DS	0.00	0.97	0.00	0.00	0.00	28.98	29.95	29.95	28.98	29.95	28.98	29.95	
ASIM													
MAX	67	63	67	65	67	65	67	67	65	67	65	67	
ANO	2020												
MIN	67	60	67	65	67								
ANO	2022												
PROM : PROMEDIO				MAX: MÁXIMO				DS: DESVIACIÓN ESTÁNDAR				MIN: MÍNIMO	

Figura 62. Informe técnico donde se muestran los valores estadísticos mensuales de filtración reportados de la Presa El Cuchillo para los años del 2018 al 2022 (CONAGUA, 2022).

Almacenamiento del embalse

Finalmente, para determinar la variación de almacenamiento del sistema se utilizaron los registros diarios de nivel y volumen almacenado disponibles en el portal de monitoreo de presas de la CONAGUA.

La información consultada corresponde a los registros diarios de almacenamiento del año 2021, expresados en hectómetros cúbicos (hm^3), los cuales permitieron conocer la condición inicial y final del embalse durante el periodo analizado, así como obtener los valores promedio requeridos para las etapas posteriores del procesamiento de información y cálculo del balance hídrico.

4.4.3 Procesamiento de información y estimación de áreas del embalse

Una vez recopilada la información hidrometeorológica, hidrométrica y operativa necesaria para el desarrollo del balance hídrico, se requirió realizar diversos procedimientos de procesamiento y transformación de datos con el fin de expresar todas las variables bajo unidades homogéneas de volumen, permitiendo su incorporación dentro de la ecuación general del balance.

La información obtenida de las diferentes fuentes consultadas presentó distintas unidades de medida y escalas de registro. Mientras algunas variables se encontraban expresadas directamente como volúmenes de agua, otras fueron reportadas en términos de gasto, lámina de agua o valores estadísticos, por lo que requirieron procesos de conversión para obtener los volúmenes utilizados en el análisis.

Los procedimientos específicos aplicados para la transformación de cada variable se describen en los apartados siguientes, donde se presentan las ecuaciones utilizadas, los criterios adoptados y los resultados obtenidos para cada componente considerado dentro del balance hídrico del embalse de la Presa El Cuchillo.

4.4.3.1 Determinación del volumen de escurrimiento

La escorrentía superficial constituye la principal entrada de agua al embalse de la Presa El Cuchillo, por lo que fue necesario determinar el volumen del agua que ingresa al sistema mediante los registros hidrométricos obtenidos de la estación Las Enramadas.

La información consultada corresponde a gastos medios diarios expresados en metros cúbicos por segundo (m^3/s) y debido a que el balance hídrico fue desarrollado en términos de volumen, fue necesario convertir dichos gastos a metros cúbicos (m^3) mediante la incorporación de la variable tiempo. La relación general utilizada para esta conversión se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$V_{esc} = Q \cdot t$$

Donde:

- V_{esc} = Volumen de escurrimiento superficial (m³).
- Q = Caudal o gasto medio (m³/s).
- t = Tiempo de ocurrencia del caudal (s).

Para el presente estudio, los registros diarios fueron agrupados mensualmente obteniendo la suma de los gastos medios diarios correspondientes a cada mes. Posteriormente, dicha suma mensual fue multiplicada por el número de segundos contenidos en un día ($t=86,400$ s), obteniendo así los volúmenes mensuales de escurrimiento expresados en metros cúbicos.

Los volúmenes mensuales calculados fueron posteriormente integrados para obtener el volumen anual de escurrimiento correspondiente al año 2021, el cual constituye una de las principales entradas consideradas dentro del balance hídrico del embalse. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 19.

Volumenes Mensuales y Anual de Escorrentía Superficial												
Presa: <u>El Cuchillo - Solidaridad</u>												
Ubicación: <u>China, Nuevo León</u>												
Año: <u>2021</u>												
Concepto	Mes											
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Σ Gastos Medios Diarios (m³/s)	133.48	93.37	74.36	58.24	65.56	834.17	885.13	451.09	231.33	311.42	329.11	129.99
Tiempo de Ocurrencia (s)	86,400	86,400	86,400	86,400	86,400	86,400	86,400	86,400	86,400	86,400	86,400	86,400
Volumen Escurrimiento (m³)	11,532,672.00	8,067,168.00	6,424,704.00	5,031,936.00	5,664,384.00	72,072,288.00	76,475,232.00	38,974,176.00	19,986,912.00	26,906,688.00	28,435,104.00	11,231,136.00
Volumen Anual de Escurrimiento (Vesc) =											310,802,400.00 m³	

Tabla 19. Determinación de los volúmenes mensuales y volumen anual de escurrimiento para el año 2021 (elaboración propia con información del Sistema de Información Hidrológica (SIH-CONAGUA), 2022).

Como resultado del procedimiento, se obtuvo un volumen total anual de escurrimiento superficial de 157,680,000.00 m³.

4.4.3.2 Determinación del volumen de precipitación

La precipitación constituye una entrada adicional de agua al embalse, correspondiente al volumen aportado por la lluvia que incide sobre el vaso de almacenamiento durante

el periodo de análisis. Debido a que los registros obtenidos de la estación climatológica El Cuchillo se encontraban expresados en forma de lámina de agua acumulada mensual (mm), fue necesario transformarlos a unidades volumétricas (m³) para su incorporación dentro del balance hídrico.

La conversión se realizó mediante la relación general entre la lámina de precipitación y el área de captación considerada, expresada mediante la siguiente ecuación:

$$V_p = P \cdot A$$

Donde:

- V_p = Volumen de precipitación directa sobre el embalse (m³).
- P = Precipitación acumulada (m).
- A = Área de captación considerada (m²).

Previamente a la aplicación de la ecuación, los valores de precipitación acumulada mensual fueron convertidos de milímetros a metros con el fin de mantener la consistencia dimensional de los cálculos.

Para el presente estudio se consideró como área de captación la superficie máxima del vaso de la Presa El Cuchillo correspondiente al Nivel de Aguas Máximas Extraordinarias (NAME), con un valor de 18,092 ha, equivalente a 180,920,000 m², obtenido de la memoria descriptiva e inventario nacional de presas de la CONAGUA.

La utilización de esta superficie se fundamenta en que la precipitación ocurrida dentro de los límites del vaso de almacenamiento tiende a incorporarse al embalse mediante escurrimientos locales de corta distancia, aun cuando parte de dicha superficie no se encuentre permanentemente inundada durante periodos de bajo almacenamiento. Bajo este criterio, se consideró que el área máxima del embalse representa adecuadamente la superficie potencial de aportación de la precipitación al sistema de almacenamiento.

Una vez convertidas las precipitaciones mensuales a unidades volumétricas, los resultados fueron integrados para obtener el volumen anual de precipitación incorporado al balance hídrico del embalse durante el año 2021. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 20.

Volumenes Mensuales y Anual de Precipitación sobre el Emblase												
Presa: <u>El Cuchillo - Solidaridad</u>												
Ubicación: <u>China, Nuevo León</u>												
Año: <u>2021</u>												
Concepto	Mes											
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Precipitación Acumulada (m)	0.01532	0.00510	0.00251	0.07800	0.07201	0.04630	0.15274	0.07060	0.00002	0.18000	0.08150	0.02000
Área del Embalse al NAME (m²)	180,920,000	180,920,000	180,920,000	180,920,000	180,920,000	180,920,000	180,920,000	180,920,000	180,920,000	180,920,000	180,920,000	180,920,000
Volumen Precipitación (m³)	2,771,694.40	922,692.00	454,109.20	14,111,760.00	13,028,049.20	8,376,596.00	27,633,720.80	12,772,952.00	3,618.40	32,565,600.00	14,744,980.00	3,618,400.00
								Volumen Anual de Precipitación (V _p) =		131,004,172.00 m³		

Tabla 20. Volúmenes mensuales y volumen anual de precipitación sobre el embalse para el año 2021 (elaboración propia con información del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) de la CONAGUA, 2022).

Como resultado del procedimiento, se obtuvo un volumen total anual de precipitación sobre el embalse de 131,004,172.00 m³.

4.4.3.3 Estimación de las áreas superficiales del embalse

Para la determinación de los volúmenes asociados a la evaporación fue necesario estimar las áreas superficiales del embalse correspondientes a los distintos niveles de almacenamiento registrados durante el año 2021. Debido a que no se contó con una curva oficial elevación-área-capacidad para el periodo de estudio, se desarrolló una relación matemática entre el volumen almacenado y el área inundada del embalse, permitiendo estimar la superficie de agua asociada a cada condición de llenado.

Para ello se utilizaron cinco condiciones representativas de almacenamiento y área superficial. Tres de ellas fueron obtenidas mediante la delimitación cartográfica del embalse en diferentes años y condiciones de llenado, mientras que las dos restantes corresponden a los valores oficiales del Nivel de Aguas Máximas Ordinarias (NAMO) y del Nivel de Aguas Máximas Extraordinarias (NAME), reportados en la memoria descriptiva de la presa.

Los datos utilizados para el ajuste corresponden a las siguientes condiciones:

- Año 2021: almacenamiento de 638.698 hm³ y área aproximada de 92.257 km².
- Año 2019: almacenamiento de 830.094 hm³ y área aproximada de 116.698 km².
- Año 2009: almacenamiento de 1,372.370 hm³ y área aproximada de 141.769 km².
- Nivel de Aguas Máximas Ordinarias (NAMO): almacenamiento de 1,123.143 hm³ y área de 127.950 km².

- Nivel de Aguas Máximas Extraordinarias (NAME): almacenamiento de 1,784.292 hm³ y área de 180.920 km².

Con la finalidad de identificar la relación funcional más adecuada entre ambas variables, se evaluaron diferentes modelos de ajuste mediante el método de mínimos cuadrados, considerando relaciones de tipo lineal, exponencial, logarítmica y potencial (Figura 63). Para cada modelo se calcularon los parámetros correspondientes y el coeficiente de correlación (r), con el propósito de seleccionar aquella ecuación que presentara el mejor ajuste a los datos disponibles.

Datos para la determinación de los parámetros de ajuste por mínimos cuadrados												N = 5
Registro	Almac. (X) (hm ³)	Área (Y) (Km ²)	X ²	Y ²	X · Y	ln(X)	ln(Y)	[ln(X)] ²	[ln(Y)] ²	ln(X) · ln(Y)	ln(X) · Y	ln(Y) · X
2009	1,372.370	141.769	1,883,399.417	20,098.449	194,559.523	7.22429	4.95420	52.19043	24.54409	35.79059	1,024.18100	6,798.99404
2019	830.094	116.698	689,056.049	13,618.423	96,870.310	6.72154	4.75959	45.17909	22.65369	31.99177	784.39015	3,950.90660
2021	638.698	92.257	407,935.135	8,511.354	58,924.361	6.45943	4.52458	41.72426	20.47181	29.22620	595.92779	2,889.83902
NAMO	1,123.143	127.950	1,261,450.198	16,371.203	143,706.147	7.02389	4.85164	49.33498	23.53841	34.07736	898.70625	5,449.08501
NAME	1,784.292	180.920	3,183,697.941	32,732.046	322,814.109	7.48678	5.19805	56.05183	27.01978	38.91668	1,354.50769	9,274.84785
Σ	5,748.597	659.594	7,425,538.741	91,331.476	816,874.449	34.91593	24.28806	244.48058	118.22777	170.00260	4,657.71289	28,363.67254

Parámetros obtenidos para los modelos de ajuste evaluados				
Ajuste	Coeficiente de Correlación r	Coeficiente de la Variable b	Constante de Ajuste a	Ecuación
Lineal	0.986	0.0717	49.4839	$Y = a + bX$
Exponencial	0.981	0.0005	72.4396	$Y = a \cdot e^{bX}$
Logarítmico	0.970	78.7074	-417.7096	$Y = a + b \cdot \ln(X)$
Potencial	0.982	0.6013	1.9321	$Y = a \cdot X^b$

Comparación de resultados obtenidos mediante los distintos ajustes						
Registro	Almac. (hm ³)	Área Real (Km ²)	Área Estimada por Ajuste			
			Lineal	Exponencial	Logarítmico	Potencial
-	500	-	85.334	93.014	71.426	81.081
2021	638.698	92.257	95.279	99.694	90.695	93.941
-	700	-	99.674	102.797	97.909	99.263
2019	830.094	116.698	109.002	109.706	111.325	109.977
-	1,000	-	121.184	119.433	125.982	123.007
NAMO	1,123.143	127.950	130.013	127.017	135.122	131.903
-	1,200	-	135.524	131.994	140.332	137.259
2009	1,372.370	141.769	147.883	143.874	150.896	148.796
-	1,500	-	157.034	153.355	157.895	156.969
NAME	1,784.292	180.920	177.418	176.779	171.555	174.235

Figura 63. Determinación de los parámetros de ajuste por mínimos cuadrados (elaboración propia, 2022).

Los resultados obtenidos muestran que el modelo lineal presentó el mayor coeficiente de correlación ($r = 0.986$), superando ligeramente a los modelos exponencial ($r = 0.981$), potencial ($r = 0.982$) y logarítmico ($r = 0.970$). Asimismo, la comparación entre las áreas observadas y las áreas estimadas evidenció que el ajuste lineal reproduce adecuadamente el comportamiento general de los datos dentro del intervalo de almacenamiento analizado.

La Figura 64 muestra el comportamiento observado entre el almacenamiento y el área superficial del embalse, así como la recta obtenida mediante el ajuste lineal seleccionado. Puede observarse que existe una relación directamente proporcional entre ambas variables, presentando una tendencia creciente conforme aumenta el volumen almacenado. La proximidad entre los valores observados y la recta de ajuste confirma la capacidad representativa del modelo adoptado para estimar las áreas superficiales requeridas en el análisis de evaporación.

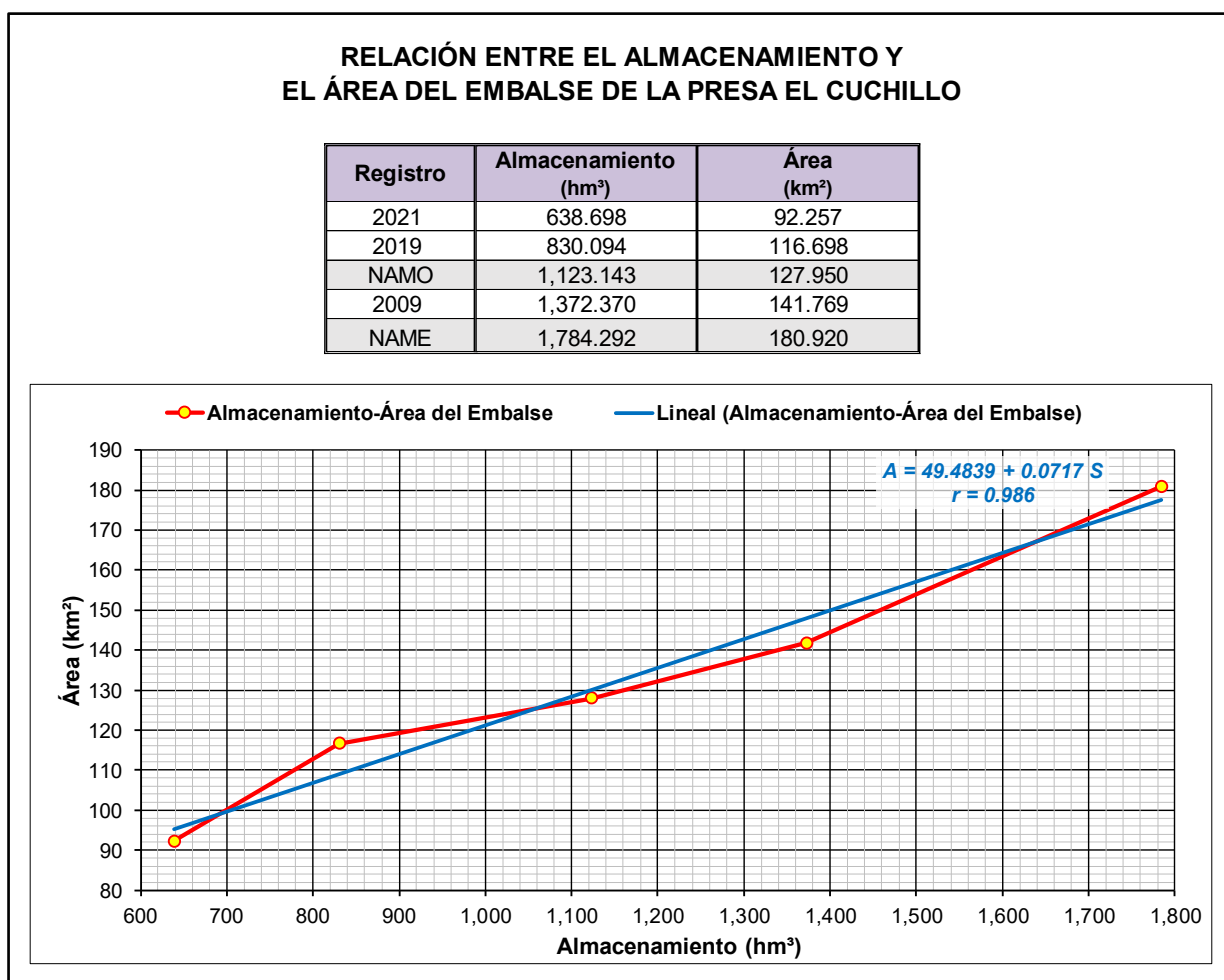


Figura 64. Relación entre el almacenamiento y el área superficial del embalse de la Presa El Cuchillo y representación del ajuste lineal seleccionado (elaboración propia, 2022).

Por tal motivo, dicho modelo fue seleccionado para la estimación de las áreas superficiales mensuales requeridas en el cálculo de los volúmenes de evaporación del embalse. La ecuación obtenida mediante regresión lineal fue la siguiente:

$$Y = 49.4839 + 0.0717X$$

Considerando que la variable “Y” representa el área superficial del embalse y la variable “X” el almacenamiento correspondiente, la ecuación aplicada para la estimación de áreas queda expresada como:

$$A = 49.4839 + 0.0717S$$

Donde:

- A = Área superficial del embalse (km^2).
- S = Almacenamiento del embalse (hm^3).

Una vez definida la ecuación de ajuste, se procedió a calcular las áreas superficiales mensuales del embalse correspondientes al año 2021 a partir de los almacenamientos promedio reportados para cada mes, las cuales fueron posteriormente empleadas para obtener los volúmenes mensuales de evaporación.

4.4.3.4 Determinación del volumen de evaporación

La evaporación constituye una de las principales salidas naturales de agua en los embalses, por lo que su adecuada cuantificación resulta indispensable para el desarrollo del balance hídrico. Para ello, las láminas mensuales de evaporación obtenidas en el apartado 4.4.2 fueron transformadas a volumen (m^3) utilizando el área superficial correspondiente a cada mes del año.

A diferencia de la precipitación, cuyo volumen se estimó considerando el área máxima de captación del vaso, la evaporación se calculó empleando el área superficial variable del embalse, debido a que esta pérdida de agua ocurre únicamente sobre la superficie efectivamente cubierta por agua en cada periodo. Para determinar las áreas superficiales mensuales fue necesario obtener previamente los almacenamientos promedio mensuales registrados durante 2021, información consultada en el Sistema Nacional de Información del Agua (SINA).

En la Figura 65 se presentan las elevaciones promedio del embalse, los almacenamientos promedios y los porcentajes de llenado correspondientes al periodo de análisis, así como la evolución mensual del volumen almacenado y su relación con los niveles de referencia correspondientes al Nivel de Aguas Máximas Ordinarias (NAMO) y al Nivel de Aguas Máximas Extraordinarias (NAME).

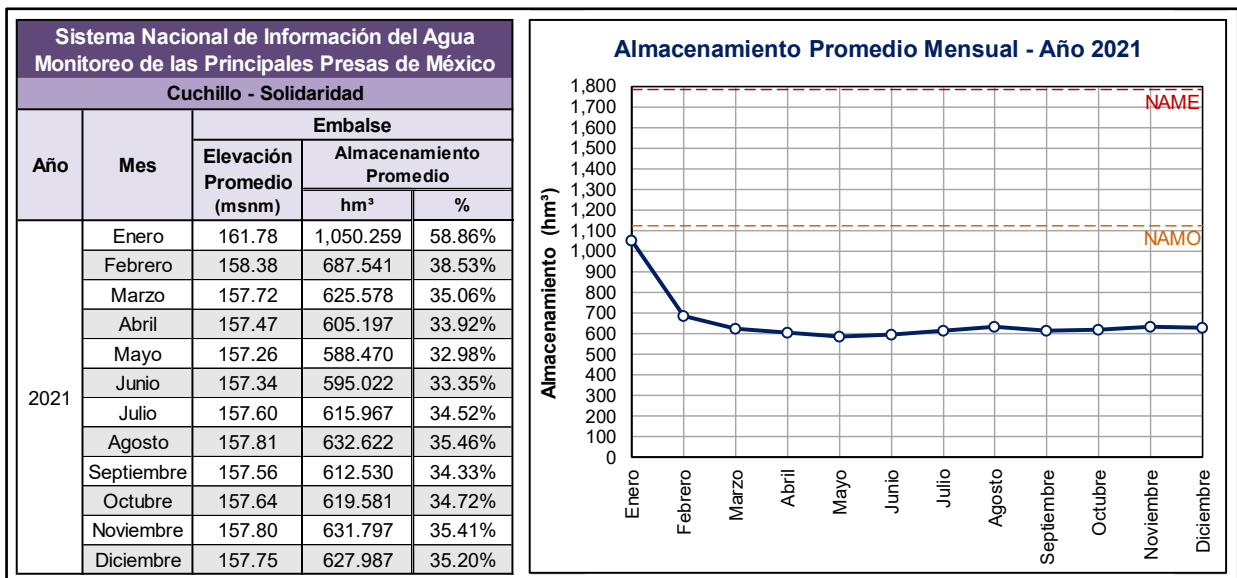


Figura 65. Elevaciones, almacenamientos y porcentajes de llenado promedios del embalse de la Presa El Cuchillo durante 2021 (elaboración propia, 2022).

Una vez obtenidos los almacenamientos promedio mensuales, se procedió a estimar las áreas superficiales correspondientes mediante la ecuación de ajuste lineal, la cual fue seleccionada por presentar el mayor coeficiente de correlación entre las variables almacenamiento y área del embalse.

$$A = 49.4839 + 0.0717S$$

La aplicación de esta ecuación permitió estimar el área superficial del embalse para cada mes del año 2021. Posteriormente, dichas áreas fueron convertidas de kilómetros cuadrados a metros cuadrados para ser utilizadas en el cálculo volumétrico de la evaporación. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 21.

Estimación de las Áreas del Embalse												
Presa: <u>El Cuchillo - Solidaridad</u>												
Año: <u>2021</u>												
Concepto	Mes											
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Almacenamiento Promedio (hm³)	1,050.259	687.541	625.578	605.197	588.470	595.022	615.967	632.622	612.530	619.581	631.797	627.987
Área Estimada del Embalse (Km²)	124.78747	98.78059	94.33784	92.87652	91.67720	92.14698	93.64873	94.84290	93.40230	93.90786	94.78374	94.51057
Área Estimada del Embalse (m²)	124,787,470	98,780,590	94,337,840	92,876,520	91,677,200	92,146,980	93,648,730	94,842,900	93,402,300	93,907,860	94,783,740	94,510,570

Tabla 21. Áreas estimadas del embalse para el año 2021 obtenidas mediante la ecuación de ajuste almacenamiento-área (elaboración propia, 2022).

Los registros de evaporación obtenidos de la estación climatológica corresponden a mediciones realizadas mediante evaporímetro tipo tanque Clase A. Debido a ello, fue necesario aplicar un factor de corrección de tanque (K_p), con la finalidad de obtener una estimación más representativa de la evaporación real sobre la superficie del embalse. De acuerdo con las recomendaciones de la Organización Meteorológica Mundial (WMO), para el evaporímetro tipo “Pan Class A” debe emplearse un factor de corrección de 0.70 para superficies libres de agua.

La evaporación corregida fue calculada mediante la siguiente expresión:

$$E_{vc} = K_p \cdot E_v$$

Donde:

- E_{vc} = Evaporación corregida (m).
- K_p = Coeficiente de corrección del evaporímetro tipo tanque Clase A (0.70).
- E_v = Evaporación observada (m).

En la Tabla 22 se presentan los datos corregidos de la evaporación acumulada mensual registrada en la estación climatológica El Cuchillo durante el año 2021.

Determinación de la Evaporación Corregida Mensual												
Estación climatológica: <u>El Cuchillo</u>												
Clave: <u>1901</u>												
Ubicación: <u>China, Nuevo León</u>												
Año: <u>2021</u>												
Concepto	Mes											
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Evaporación Acumulada (mm)	90.17	85.05	187.35	194.46	214.29	210.74	192.30	239.72	207.46	139.20	91.85	82.50
Evaporación Acumulada (m)	0.09017	0.08505	0.18735	0.19446	0.21429	0.21074	0.19230	0.23972	0.20746	0.13920	0.09185	0.08250
Evaporación Corregida (m)	0.06312	0.05954	0.13115	0.13612	0.15000	0.14752	0.13461	0.16780	0.14522	0.09744	0.06430	0.05775

Tabla 22. Determinación de la evaporación acumulada mensual corregida mediante el coeficiente de corrección K_p (elaboración propia, 2022).

Una vez obtenida la evaporación corregida para cada mes y conocidas las áreas estimadas del embalse, se procedió al cálculo de los volúmenes evaporados mediante la siguiente expresión:

$$V_{evp} = E_{vc} \cdot A$$

Donde:

- V_{evp} = Volumen perdido por evaporación (m³).
- E_{vc} = Evaporación corregida (m).
- A = Área superficial estimada del embalse (m²).

Los volúmenes mensuales obtenidos, así como el volumen anual de evaporación correspondiente al año 2021, se presentan en la Tabla 23.

Volumenes Mensuales y Anual de Evaporación sobre el Embalse												
Presa: <u>El Cuchillo - Solidaridad</u>												
Ubicación: <u>China, Nuevo León</u>												
Año: <u>2021</u>												
Concepto	Mes											
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Evaporación Corregida (m)	0.06312	0.05954	0.13115	0.13612	0.15000	0.14752	0.13461	0.16780	0.14522	0.09744	0.06430	0.05775
Área Estimada del Embalse (m ²)	124,787,470	98,780,590	94,337,840	92,876,520	91,677,200	92,146,980	93,648,730	94,842,900	93,402,300	93,907,860	94,783,740	94,510,570
Volumen de Evaporación (m ³)	7,876,585.11	5,881,396.33	12,372,407.72	12,642,351.90	13,751,580.00	13,593,522.49	12,606,055.55	15,914,638.62	13,563,882.01	9,150,381.88	6,094,594.48	5,457,985.42
Volumen Anual de Evaporación (V _{evp}) =											128,905,381.51 m ³	

Tabla 23. Volúmenes mensuales y volumen anual de evaporación estimados para el embalse de la Presa El Cuchillo durante 2021 (elaboración propia, 2022).

Como resultado de este procedimiento, se obtuvo un volumen anual de evaporación de 128,905,381.49 m³.

4.4.3.5 Determinación del volumen para abastecimiento de agua potable

La extracción para abastecimiento de agua potable constituye una de las principales salidas del sistema analizado dentro del balance hídrico del embalse de la Presa El Cuchillo. Para cuantificar este componente se consideraron los aprovechamientos que extraen agua directamente del embalse durante el año 2021, correspondientes a los acueductos El Cuchillo-Monterrey y China-Los Aldama.

La información utilizada fue obtenida a partir de registros oficiales de infraestructura hidráulica y aprovechamientos de aguas nacionales reportados por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), identificando para cada obra de extracción el gasto medio diario autorizado o reportado para su operación.

Debido a que la información disponible se encuentra expresada en unidades de caudal (m^3/s), fue necesario transformarla a unidades volumétricas (m^3) para su incorporación al balance hídrico mensual y anual del embalse.

La conversión se realizó mediante la siguiente expresión:

$$V_{ex} = \Sigma Q_d \cdot t$$

Donde:

- V_{ex} = Volumen de extracción (m^3).
- ΣQ_d = Sumatoria de gastos medios diarios registrados (m^3/s).
- t = Tiempo de ocurrencia equivalente a un día (86,400 s).

Esta expresión permite transformar la suma de los gastos medios diarios reportados durante cada mes en un volumen mensual equivalente, obteniendo posteriormente el volumen anual mediante la integración de los valores mensuales.

Extracción mediante el acueducto El Cuchillo-Monterrey

El principal aprovechamiento para abastecimiento asociado a la presa corresponde al acueducto El Cuchillo-Monterrey, infraestructura destinada al suministro de agua potable para la Zona Metropolitana de Monterrey.

Para el año 2021 se consideró un gasto medio diario de operación de $5 \text{ m}^3/\text{s}$. A partir de este valor se realizó la conversión a volúmenes mensuales mediante la ecuación anteriormente descrita. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 24.

Volumenes Mensuales y Anual de Extracción para el Acueducto El Cuchillo - Monterrey												
Acueducto: <u>El Cuchillo - Monterrey</u>												
Ubicación: <u>China, Nuevo León</u>												
Año: <u>2021</u>												
Gasto Medio Diario: <u>5 m³/s</u>												
Concepto	Mes											
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Σ Mensual del Gasto Medio Diario (m^3/s)	155.00	140.00	155.00	150.00	155.00	150.00	155.00	155.00	150.00	155.00	150.00	155.00
Tiempo de Ocurrencia (s)	86,400	86,400	86,400	86,400	86,400	86,400	86,400	86,400	86,400	86,400	86,400	86,400
Volumen de Extracción (m^3)	13,392,000.00	12,096,000.00	13,392,000.00	12,960,000.00	13,392,000.00	12,960,000.00	13,392,000.00	13,392,000.00	12,960,000.00	13,392,000.00	12,960,000.00	13,392,000.00
Volumen Anual de Extracción (V_{ex1}) =										157,680,000.00 m ³		

Tabla 24. Determinación de los volúmenes mensuales y volumen anual de extracción del acueducto El Cuchillo-Monterrey durante 2021 (elaboración propia, 2022).

Extracción mediante el Acueducto China-Los Aldama

Adicionalmente, se consideró la extracción realizada mediante el acueducto China-Los Aldama, infraestructura localizada aguas abajo de la presa y registrada por la Comisión Nacional del Agua con un gasto medio diario de 0.11409 m³/s.

Para este caso se aplicó la misma metodología de conversión empleada para el acueducto El Cuchillo-Monterrey, obteniéndose los volúmenes mensuales correspondientes, los cuales se muestran en la Tabla 25.

Volumenes Mensuales y Anual de Extracción para el Acueducto China - Los Aldama												
Acueducto: <u>China - Los Aldama</u>												
Ubicación: <u>China, Nuevo León</u>												
Año: <u>2021</u>												
Gasto Medio Diario: <u>0.11409 m³/s</u>												
Concepto	Mes											
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Σ Mensual del Gasto Medio Diario (m³/s)	3.5368	3.1945	3.5368	3.4227	3.5368	3.4227	3.5368	3.5368	3.4227	3.5368	3.4227	3.5368
Tiempo de Ocurrencia (s)	86,400	86,400	86,400	86,400	86,400	86,400	86,400	86,400	86,400	86,400	86,400	86,400
Volumen de Extracción (m³)	305,579.52	276,004.80	305,579.52	295,721.28	305,579.52	295,721.28	305,579.52	305,579.52	295,721.28	305,579.52	295,721.28	305,579.52
											Volumen Anual de Extracción (V _{ex2}) =	
											3,597,946.56 m³	

Tabla 25. Determinación de los volúmenes mensuales y volumen anual de extracción del acueducto China-Los Aldama durante 2021 (elaboración propia, 2022).

Integración del volumen total de extracción para abastecimiento

Finalmente, el volumen total de extracción para abastecimiento de agua potable considerado en el balance hídrico fue obtenido mediante la suma de los volúmenes anuales calculados para ambos aprovechamientos:

$$V_{ab} = V_{ex1} + V_{ex2}$$

Donde:

- V_{ab} = Volumen destinado al abastecimiento de agua potable (m³).
- V_{ex1} = Volumen de extracción del acueducto El Cuchillo-Monterrey (m³).
- V_{ex2} = Volumen de extracción del acueducto China-Los Aldama (m³).

Los valores mensuales integrados para ambos aprovechamientos y el volumen anual resultante se presentan en la Tabla 26.

Volumenes Mensuales y Anual de Extracción para Abastecimiento												
Presa: <u>El Cuchillo - Solidaridad</u>												
Ubicación: <u>China, Nuevo León</u>												
Año: <u>2021</u>												
Concepto	Mes											
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Volumen Extracción Acueducto China-Monterrey (m³)	13,392,000.00	12,096,000.00	13,392,000.00	12,960,000.00	13,392,000.00	12,960,000.00	13,392,000.00	13,392,000.00	12,960,000.00	13,392,000.00	12,960,000.00	13,392,000.00
Volumen Extracción Acueducto China-Los Aldama (m³)	305,580	276,005	305,580	295,721	305,580	295,721	305,580	305,580	295,721	305,580	295,721	305,580
Volumen de Extracción para Abastecimiento (m³)	13,697,579.52	12,372,004.80	13,697,579.52	13,255,721.28	13,697,579.52	13,255,721.28	13,697,579.52	13,697,579.52	13,255,721.28	13,697,579.52	13,255,721.28	13,697,579.52
Volumen Anual de Extracción para Abastecimiento (V _{ex}) =											161,277,946.56 m³	

Tabla 26. Determinación de los volúmenes mensuales y volumen anual de extracción para abastecimiento de agua potable de la presa El Cuchillo durante 2021 (elaboración propia, 2022).

El volumen total de extracción para abastecimiento de agua potable fue de 161,277,946.56 m³, representando uno de los principales componentes de salida del sistema y reflejando la importancia estratégica de la Presa El Cuchillo como fuente de abastecimiento para la Zona Metropolitana de Monterrey y localidades del noreste del estado de Nuevo León.

4.4.3.6 Obtención del volumen para riego

Debido a que la información disponible para riego únicamente se encuentra reportada de manera anual, no fue posible identificar la distribución real de los volúmenes utilizados durante cada mes del año 2021. Por tal motivo, y con el fin de incorporar esta variable dentro de la estructura mensual del balance hídrico, se realizó una distribución uniforme del volumen anual reportado entre los doce meses del periodo de análisis.

De esta manera, se asignó un volumen mensual constante de 824,250 m³ para cada uno de los meses del año 2021. Los valores obtenidos se presentan en la Tabla 27.

Distribución Mensual del Volumen Anual destinado para Riego												
Presa: <u>El Cuchillo - Solidaridad</u>												
Ubicación: <u>China, Nuevo León</u>												
Año: <u>2021</u>												
Concepto	Mes											
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Volumen para Riego (m³)	824,250.00	824,250.00	824,250.00	824,250.00	824,250.00	824,250.00	824,250.00	824,250.00	824,250.00	824,250.00	824,250.00	824,250.00
Volumen Anual Suministrado para Riego (V _r) =											9,891,000.00 m³	

Tabla 27. Distribución mensual del volumen anual de agua destinado a riego de la presa El Cuchillo durante 2021 (elaboración propia, 2022).

Es importante señalar que esta distribución mensual uniforme constituye una aproximación metodológica adoptada exclusivamente para fines de integración del balance hídrico. Debido a la ausencia de registros mensuales oficiales, no fue posible reproducir el comportamiento real de la demanda de riego durante el año de estudio. Sin embargo, dado que el objetivo principal del análisis consiste en evaluar el comportamiento volumétrico anual del embalse e identificar posibles pérdidas asociadas a filtraciones, la distribución empleada no modifica el volumen total anual considerado dentro del balance.

Por lo tanto, el volumen anual de extracción para riego incorporado al balance hídrico del embalse durante el año 2021 fue de 9,891,000 m³, valor que representa la extracción destinada al distrito de riego 031 Las Lajas considerada dentro de las salidas del sistema.

4.4.3.7 Obtención del volumen de trasvase

El volumen anual de trasvase considerado en el balance hídrico corresponde a 450,000,000 m³, valor reportado oficialmente para las maniobras de transferencia de agua realizadas desde la Presa El Cuchillo durante el año 2021.

Debido a que la información disponible únicamente reporta el volumen total transferido, fue necesario estimar su distribución temporal para incorporarlo al balance hídrico mensual. Para ello se utilizó el gasto medio de desfogue reportado para la operación de trasvase, correspondiente a 250 m³/s, así como la fecha de inicio de las maniobras establecida para el 24 de enero de 2021.

El tiempo teórico requerido para transferir el volumen total se determinó dividiendo el volumen total de trasvase (450,000,000 m³) entre el gasto medio de operación (250 m³/s), obteniéndose un tiempo total de 1,800,000 segundos, equivalente a 20.83 días.

Considerando que las maniobras iniciaron el 24 de enero, se estimó que aproximadamente 8 días de operación ocurrieron durante el mes de enero, mientras que los días restantes correspondieron al mes de febrero. Con base en esta distribución temporal, se asignó un volumen de 172,800,000 m³ para enero y el volumen restante, equivalente a 277,200,000 m³, para febrero.

Esta distribución temporal fue cotejada con los registros diarios de almacenamiento del embalse, observándose una disminución significativa de los volúmenes almacenados entre el 24 de enero y el 13 de febrero, periodo durante el cual se registraron descensos diarios del orden de 12 a 28 millones de metros cúbicos. Este comportamiento resulta consistente con las maniobras de desfogue, por lo que se consideró razonable asignar la totalidad del volumen transferido a los meses de enero y febrero.

El volumen anual considerado para el balance hídrico y su distribución mensual se presentan en la Tabla 28.

Distribución Mensual del Volumen Reportado de Traslase												
Presa: <u>El Cuchillo - Solidaridad</u>												
Ubicación: <u>China, Nuevo León</u>												
Año: <u>2021</u>												
Concepto	Mes											
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Volumen de Traslase (m³)	172,800,000.00	277,200,000.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Volumen Anual Reportado de Traslase (V _{tr}) =											450,000,000.00 m³	

Tabla 28. Distribución mensual del volumen reportado de trasvase de la presa El Cuchillo durante 2021 (elaboración propia, 2022).

El volumen total incorporado al balance hídrico para el concepto de trasvase fue de 450,000,000 m³, distribuidos entre los meses de enero y febrero conforme al periodo estimado de operación de las maniobras de transferencia. Debido a su magnitud, esta variable representa la principal salida extraordinaria considerada dentro del balance hídrico anual del embalse.

4.4.3.8 Obtención del volumen de filtraciones

Los volúmenes de filtración utilizados en el balance hídrico corresponden a los valores previamente obtenidos de los registros estadísticos reportados por la CONAGUA para la presa El Cuchillo-Solidaridad durante el año 2021. Para su incorporación al análisis, fue necesario ajustar las unidades a metros cúbicos, con el fin de mantener la consistencia con el resto de las variables consideradas. Esta conversión se realizó multiplicando cada valor mensual por un factor de 1,000.

A partir de este ajuste, se obtuvieron los volúmenes mensuales de filtración que fueron integrados en el balance hídrico, cuyos resultados se presentan en la Tabla 29.

Volúmenes Mensuales y Anual de Filtraciones Reportados por CONAGUA												
Presa: <u>El Cuchillo - Solidaridad</u>												
Ubicación: <u>China, Nuevo León</u>												
Año: <u>2021</u>												
Concepto	Mes											
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Volumen de Filtraciones (m³)	66,960.00	60,480.00	66,960.00	64,800.00	66,960.00	64,800.00	66,960.00	66,960.00	64,800.00	66,960.00	64,800.00	66,960.00
Volumen Anual Reportado de Filtraciones (Vf) =											788,400.00 m³	

Tabla 29. Volúmenes mensuales y anual de filtraciones reportados por CONAGUA para la presa El Cuchillo durante 2021 (elaboración propia, 2022).

El volumen anual considerado fue de 788,400 m³, el cual se empleó como referencia para el análisis del comportamiento del sistema. Este valor permitió establecer un punto de comparación frente a los resultados obtenidos mediante el balance hídrico, con el objetivo de evaluar la correspondencia entre las filtraciones reportadas y aquellas inferidas a partir de la dinámica del embalse durante el periodo de estudio.

4.4.4 Integración y comparación del balance hídrico

Una vez estimados los volúmenes correspondientes a cada una de las componentes del balance hídrico, éstos fueron integrados para determinar la variación mensual y anual del almacenamiento del embalse mediante la ecuación general:

$$\Delta S_{BH} = (E_s + P_p) - (E_v + E_a + I_r + T_r + I_f)$$

Dado que todas las componentes del balance fueron previamente cuantificadas en unidades de volumen, la integración se realizó sustituyendo cada término de la ecuación general por su volumen correspondiente, conservando el mismo principio de conservación de masa. La expresión equivalente utilizada fue la siguiente:

$$\Delta S_{BH} = (V_{esc} + V_p) - (V_{evp} + V_{ab} + V_r + V_{tr} + V_f)$$

Posteriormente, los volúmenes correspondientes a cada una de las componentes fueron integrados para cada uno de los meses del año 2021. Esta integración permitió obtener la variación mensual estimada del almacenamiento del embalse, con el propósito de analizar el comportamiento temporal de las entradas y salidas consideradas en el balance hídrico. Los resultados de esta integración mensual se presentan en la Tabla 30.

Integración Mensual de las Entradas y Salidas consideradas en el Balance Hídrico del Embalse de la Presa El Cuchillo												
Presa: <u>El Cuchillo - Solidaridad</u> Ubicación: <u>China, Nuevo León</u> Año: <u>2021</u>												
Parámetro	2021											
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Escorrentía (m³)	+11,532,672.00	+8,067,168.00	+6,424,704.00	+5,031,936.00	+5,664,384.00	+72,072,288.00	+76,475,232.00	+38,974,176.00	+19,986,912.00	+26,906,688.00	+28,435,104.00	+11,231,136.00
Precipitación (m³)	+2,771,694.40	+922,692.00	+454,109.20	+14,111,760.00	+13,028,049.20	+8,376,596.00	+27,633,720.80	+12,772,952.00	+3,618.40	+32,565,600.00	+14,744,980.00	+3,618,400.00
Evaporación (m³)	-7,876,585.11	-5,881,396.33	-12,372,407.72	-12,642,351.90	-13,751,580.00	-13,593,522.49	-12,606,055.55	-15,914,638.62	-13,563,882.01	-9,150,381.88	-6,094,594.48	-5,457,985.42
Abastecimiento de Agua Potable (m³)	-13,697,579.52	-12,372,004.80	-13,697,579.52	-13,255,721.28	-13,697,579.52	-13,255,721.28	-13,697,579.52	-13,697,579.52	-13,255,721.28	-13,697,579.52	-13,255,721.28	-13,697,579.52
Riego (m³)	-824,250.00	-824,250.00	-824,250.00	-824,250.00	-824,250.00	-824,250.00	-824,250.00	-824,250.00	-824,250.00	-824,250.00	-824,250.00	-824,250.00
Trasvase (m³)	-172,800,000.00	-277,200,000.00	-0,000.00	-0,000.00	-0,000.00	-0,000.00	-0,000.00	-0,000.00	-0,000.00	-0,000.00	-0,000.00	-0,000.00
Filtraciones (m³)	-66,960.00	-60,480.00	-66,960.00	-64,800.00	-66,960.00	-64,800.00	-66,960.00	-66,960.00	-64,800.00	-66,960.00	-64,800.00	-66,960.00
Sumatoria	-180,961,008.23	-287,348,271.13	-20,082,384.04	-7,643,427.18	-9,647,936.32	52,710,590.23	76,914,107.73	21,243,699.86	-7,718,122.89	35,733,116.60	22,940,718.24	-5,197,238.94
												-309,056,156.07

Tabla 30. Integración mensual de las entradas y salidas consideradas en el balance hídrico del embalse de la Presa El Cuchillo durante el año 2021 (elaboración propia, 2022).

A partir de la integración mensual se obtuvo el volumen acumulado anual de cada componente del balance. Posteriormente, la suma de las entradas y salidas permitió determinar la variación anual del almacenamiento del embalse (ΔS_{BH}). Este resultado corresponde al balance hídrico del periodo de estudio y se presenta en la Tabla 31.

Balance Hídrico del Embalse de la Presa El Cuchillo		
Año: <u>2021</u>		
Parámetro	Volumen anual	
	m³	hm³
Escorrentía	+310,802,400.00	+310.802
Precipitación	+131,004,172.00	+131.004
Evaporación	-128,905,381.51	-128.905
Abastecimiento de Agua Potable	-161,277,946.56	-161.278
Riego	-9,891,000.00	-9.891
Trasvase	-450,000,000.00	-450.000
Filtraciones	-788,400.00	-0.788
Variación del Almacenamiento (ΔS_{BH})	-309,056,156.07	-309.056

Tabla 31. Balance hídrico anual del embalse de la Presa El Cuchillo (elaboración propia, 2022).

Como resultado de la integración de todos los componentes considerados en el balance, se obtuvo una variación anual del almacenamiento de **-309.056 hm³**. Con el propósito de evaluar la consistencia del balance hídrico desarrollado, este valor fue comparado con la variación del almacenamiento observada en el embalse, determinada a partir de los registros oficiales de la CONAGUA.

Para ello, se consideraron los volúmenes almacenados al inicio y al final del periodo de estudio, correspondientes al 1 de enero y al 31 de diciembre de 2021, con valores de 1,081.363 hm³ y 625.709 hm³, respectivamente. La sustitución de estos datos en la ecuación presentada en el apartado 4.4.1, permitió obtener la variación del almacenamiento observada mediante los registros:

$$\Delta S_{Obs} = S_f - S_i$$

$$\Delta S_{Obs} = 625.709 \text{ hm}^3 - 1,081.363 \text{ hm}^3$$

$$\Delta S_{Obs} = -455.654 \text{ hm}^3$$

La variación del almacenamiento obtenida a partir de los registros representa la disminución real del volumen almacenado en el embalse durante el año 2021. Con este valor y el obtenido mediante el balance hídrico, se realizó una comparación con el fin de cuantificar la diferencia entre ellos. Para ello, se definió la diferencia residual del balance mediante la siguiente expresión:

$$\Delta S_R = \Delta S_{Obs} - \Delta S_{BH}$$

Donde:

- ΔS_R = Diferencia residual del balance.
- ΔS_{Obs} = Variación del almacenamiento observada en los registros.
- ΔS_{BH} = Variación del almacenamiento estimada mediante el balance hídrico.

La comparación entre la variación del almacenamiento estimada mediante el balance hídrico y la variación observada en los registros oficiales permitió evaluar el grado de correspondencia entre ambos procedimientos. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 32.

Comparación de las Estimaciones de la Variación Anual del Almacenamiento del Embalse de la Presa El Cuchillo		
Año: <u>2021</u>		
Concepto	Volumen	
	(m³)	(hm³)
Variación del almacenamiento de registros (ΔS_{Obs})	-455,654,000.000	-455.654
Variación del almacenamiento del balance hídrico (ΔS_{BH})	-309,056,156.070	-309.056
Diferencia Residual del Balance (ΔS_R)	-146,597,843.930	-146.598

Tabla 32. Comparación entre la variación del almacenamiento estimada mediante el balance hídrico y la variación observada del embalse de la Presa El Cuchillo durante 2021 (elaboración propia, 2022).

Como resultado de la comparación entre la variación del almacenamiento estimada mediante el balance hídrico y la observada en los registros oficiales, se obtuvo una diferencia residual de **-146,597,843.930 m³**, equivalente a **-146.598 hm³**. El signo negativo indica que la disminución del almacenamiento observada en el embalse fue mayor que la estimada mediante el balance hídrico desarrollado en esta investigación.

4.4.5 Alcances y consideraciones del balance hídrico

El balance hídrico desarrollado en la presente investigación constituye una herramienta metodológica para evaluar el comportamiento volumétrico del embalse durante el periodo de estudio, integrando las principales componentes hidrológicas y operativas para estimar la variación del almacenamiento y contrastarla con los registros oficiales.

Los resultados obtenidos constituyen una aproximación al comportamiento general del embalse, cuya confiabilidad depende de la disponibilidad y calidad de la información utilizada, así como de los criterios metodológicos adoptados para su integración. El balance no pretende reproducir de forma individual todos los procesos físicos que intervienen en la dinámica del sistema, sino representar de manera integrada la contribución de sus principales componentes a la variación del almacenamiento, proporcionando una base cuantitativa para evaluar el comportamiento del embalse.

Una de las principales fortalezas de este procedimiento radica en la posibilidad de comparar la variación del almacenamiento estimada mediante el balance con la obtenida a partir de los registros oficiales del embalse. Esta comparación proporciona un criterio objetivo para evaluar la consistencia del balance e identificar diferencias entre el comportamiento estimado y el observado.

Bajo estas consideraciones, la diferencia residual obtenida entre ambas estimaciones representa una discrepancia que requiere un análisis complementario para determinar su posible origen. Considerando que las filtraciones incorporadas al balance corresponden a valores estadísticos reportados, dicha diferencia constituye un elemento de evaluación para valorar la representatividad de esta componente dentro del balance y determinar si existen procesos asociados a las filtraciones que no fueron completamente reflejados.

De esta manera, el balance hídrico proporciona una base metodológica para el análisis presentado en el apartado siguiente. La diferencia residual obtenida constituye un elemento complementario para la interpretación del comportamiento del embalse y para evaluar la representatividad de las filtraciones consideradas durante el desarrollo del balance.

4.5 Estimación del gasto del río San Juan

4.5.1 Levantamiento y medición de velocidades

Con el propósito de estimar el gasto circulante en el río San Juan mediante el método sección–velocidad, se realizó un levantamiento de campo para determinar la geometría de una sección transversal representativa del cauce y efectuar mediciones puntuales de la velocidad del flujo.

El levantamiento se efectuó el 1 de octubre de 2021, en un tramo del río San Juan localizado aproximadamente 2 km aguas abajo de la cortina de la presa El Cuchillo, en el municipio de China, Nuevo León. Como sitio de medición se seleccionó un puente vehicular que cruza el cauce de manera prácticamente perpendicular a la dirección del flujo (Figura 66), cuya estructura proporcionó una referencia estable para establecer la sección transversal y realizar las mediciones desde un mismo alineamiento.



Figura 66. Ubicación del sitio de levantamiento sobre el río San Juan, aguas abajo de la cortina (elaboración propia a partir de imagen satelital de Google Earth Pro, 2026).

Los extremos de la sección se localizaron aproximadamente en las coordenadas UTM 474005.34 m E, 2844543.36 m N, para la margen izquierda, y 474025.28 m E, 2844481.31 m N, para la margen derecha. Estas coordenadas se obtuvieron mediante

el sistema de posicionamiento global (GPS) integrado en un dispositivo móvil y se utilizaron como referencia para la ubicación del sitio de levantamiento.

Durante el levantamiento no se registraron precipitaciones en el área de estudio ni en los días inmediatos anteriores. Asimismo, no se identificaron descargas extraordinarias asociadas a la operación de las compuertas de la presa ni operaciones de trasvase durante el periodo de medición. Bajo estas condiciones, el flujo observado se consideró representativo de las condiciones existentes en el cauce durante el levantamiento, reduciendo la influencia de variaciones asociadas a eventos recientes de precipitación o a descargas extraordinarias del embalse.

Para realizar el levantamiento se empleó un flexómetro para establecer las distancias sobre la sección transversal, una cuerda graduada con lastre para determinar las profundidades del cauce, un medidor portátil de velocidad marca HACH modelo FH950 para registrar la velocidad del flujo y un dispositivo con GPS para obtener la ubicación aproximada del sitio.

Una vez definida la sección transversal, se tomó como punto inicial el borde del espejo de agua correspondiente a la margen izquierda, identificado como P-0. A partir de éste se establecieron estaciones cada 5 m hasta alcanzar la margen opuesta, obteniéndose una longitud total de 65 m. En cada estación se determinó la profundidad mediante una cuerda graduada con lastre, manteniéndola en posición vertical hasta alcanzar el lecho y tomando como referencia el nivel del espejo de agua. De esta manera se obtuvieron catorce puntos distribuidos a lo largo de la sección.

Los valores registrados se presentan en la Tabla 33 y la geometría resultante de la sección transversal se muestra en la Figura 67.

A partir de las mediciones se obtuvo una sección con un ancho aproximado de 65 m y una profundidad máxima de 4.18 m, registrada hacia la parte central del cauce. La geometría levantada se utilizó posteriormente para determinar el área hidráulica de la sección y efectuar la estimación del gasto.

Levantamiento de la Sección Transversal del Río San Juan		
Ubicación: <u>China, Nuevo León</u>		
Fecha: <u>1-October-2021</u>		
Estación	Distancia (m)	Profundidad (m)
P-0	0.00	0.00
P-1	5.00	2.35
P-2	10.00	3.00
P-3	15.00	2.97
P-4	20.00	3.60
P-5	25.00	4.07
P-6	30.00	4.09
P-7	35.00	3.90
P-8	40.00	4.10
P-9	45.00	4.18
P-10	50.00	3.82
P-11	55.00	2.47
P-12	60.00	1.90
P-13	65.00	0.00

Tabla 33. Profundidades registradas en la sección transversal del río San Juan (elaboración propia, 2022).

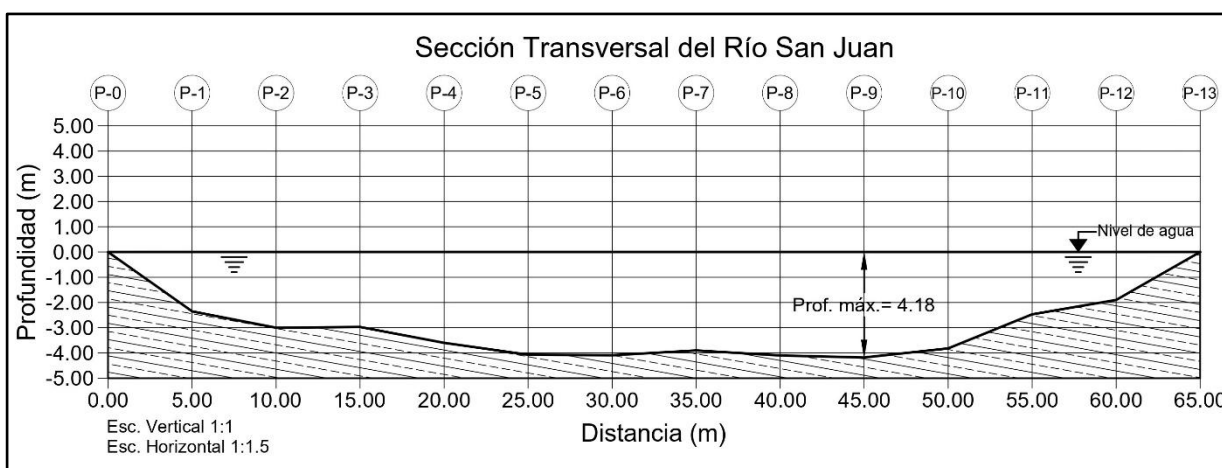


Figura 67. Sección transversal del río San Juan obtenida a partir del levantamiento de campo (elaboración propia, 2022).

Las mediciones de velocidad se realizaron mediante el medidor electromagnético HACH-FH950 (Figura 68). Debido a las condiciones de acceso al cauce desde el puente, las mediciones se concentraron en la vertical correspondiente al punto P-6, localizada aproximadamente en la parte central de la sección y con una profundidad de 4.09 m. La selección de esta vertical permitió efectuar mediciones a diferentes niveles del tirante y obtener un perfil vertical de velocidades para las condiciones presentes durante el levantamiento.



Figura 68. Medidor electromagnético de velocidad HACH-FH950 (elaboración propia, 2021).

En la vertical correspondiente a la estación P-6 se realizaron tres mediciones puntuales de velocidad: la primera aproximadamente 0.20 m sobre el lecho, la segunda aproximadamente a media profundidad del tirante y la tercera próxima a la superficie del agua. Las velocidades registradas fueron de 0.0218, 0.0769 y 0.1253 m/s, respectivamente. La ubicación de estos puntos dentro de la sección transversal se presenta en la Figura 69.

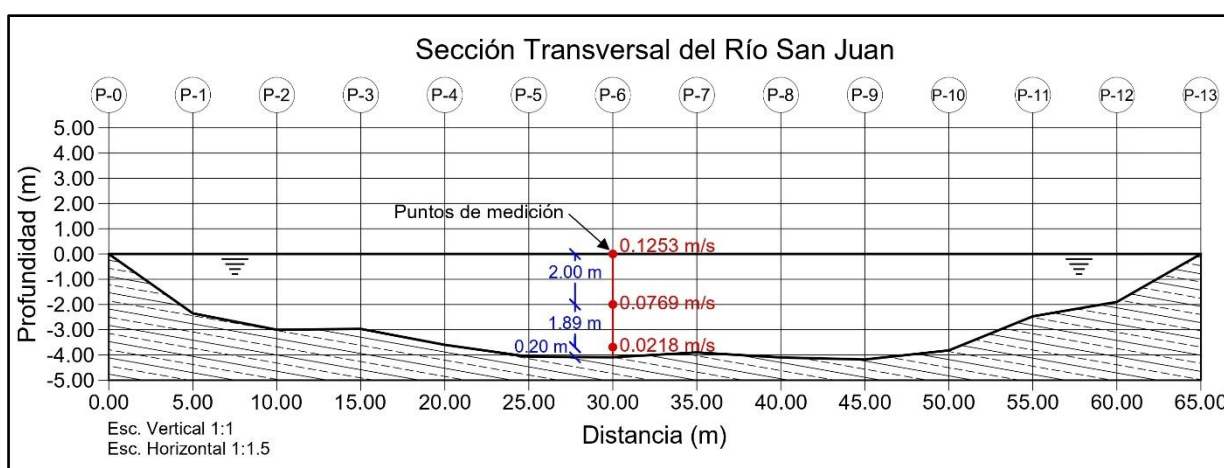


Figura 69. Ubicación de las mediciones puntuales de velocidad realizadas en la vertical P-6 de la sección transversal del río San Juan (elaboración propia, 2022).

Las mediciones obtenidas permitieron caracterizar la variación de la velocidad con la profundidad en la vertical seleccionada. Estos valores, juntamente con la geometría de la sección transversal, constituyeron la información de campo utilizada para estimar el gasto circulante mediante el procedimiento descrito en el apartado siguiente.

4.5.2 Determinación del área hidráulica y cálculo del gasto

A partir de la geometría de la sección transversal y de las mediciones de velocidad obtenidas durante el levantamiento, se estimó el gasto circulante en el río San Juan mediante la relación sección–velocidad. Para ello, la sección se dividió en 13 dovelas, delimitadas por las estaciones P-0 a P-13 establecidas a intervalos de 5 m (Figura 70), determinándose para cada una su área parcial y una velocidad media estimada.

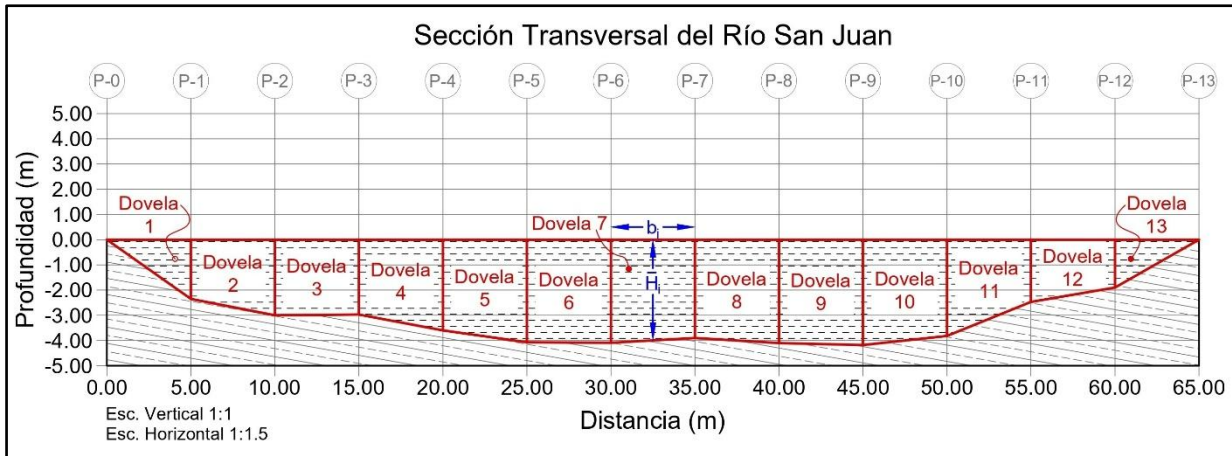


Figura 70. División de la sección transversal del río San Juan en dovelas (elaboración propia, 2022).

Debido a que las profundidades fueron determinadas en los extremos de cada dovela, se adoptó como profundidad media el promedio de los valores correspondientes a las dos estaciones que la delimitan:

$$y_i = \frac{h_i + h_{i+1}}{2}$$

Donde:

- y_i = Profundidad media de la dovela i (m).
- h_i = Profundidad medida en la estación inicial (m).
- h_{i+1} = Profundidad medida en la estación final (m).

El área parcial de cada dovela se determinó mediante:

$$a_i = b_i \cdot y_i$$

Donde:

- a_i = Área parcial de la dovela i (m²).

- b_i = Ancho de la dovela i (m).
- y_i = Profundidad media de la dovela i (m).

Debido a que las estaciones fueron establecidas a intervalos regulares, se utilizó un ancho de 5 m para las 13 dovelas. El área hidráulica total de la sección se obtuvo mediante la suma de las áreas parciales:

$$A = \sum_{i=1}^{13} a_i$$

Obteniéndose:

$$A = 202.25 \text{ m}^2$$

Para estimar la velocidad media correspondiente a cada dovela se utilizó como referencia la distribución vertical obtenida en P-6, donde se realizaron las tres mediciones puntuales (Figura 69). Con el propósito de expresar las posiciones de estas mediciones respecto al lecho, se consideraron las velocidades de 0.0218, 0.0769 y 0.1253 m/s, correspondientes a alturas de 0.20, 2.09 y 4.09 m, respectivamente. Asimismo, se adoptó una velocidad igual a cero en el contacto con el lecho, estableciéndose el perfil vertical de referencia mostrado en la Figura 71.

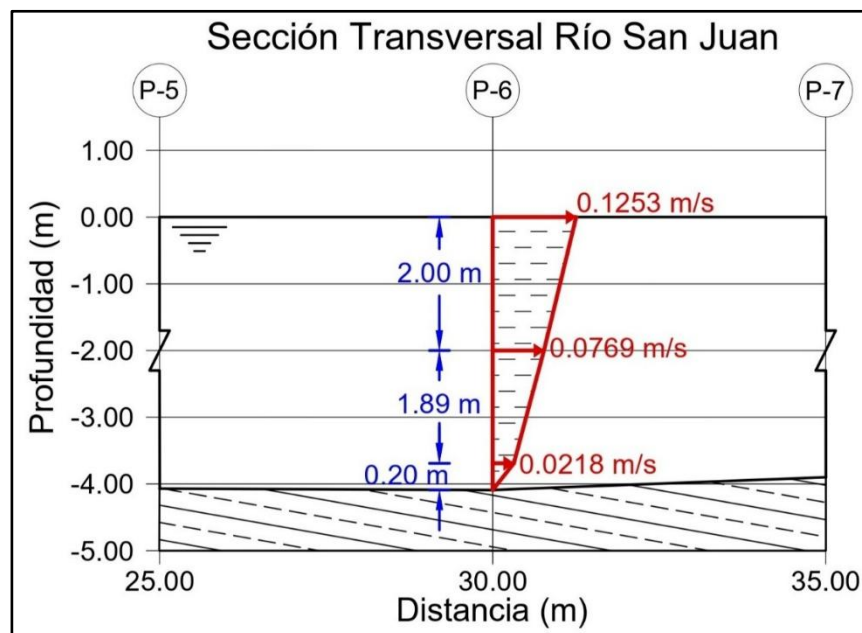


Figura 71. Perfil vertical de velocidades de referencia (elaboración propia, 2022).

A partir de los valores conocidos se consideró una variación lineal de la velocidad entre los puntos del perfil. Este criterio permitió estimar la distribución vertical de velocidades correspondiente a la profundidad media de cada dovela, conservando como referencia el comportamiento observado durante las mediciones de campo. De esta manera, para las dovelas de menor profundidad se consideró únicamente la porción correspondiente del perfil, mientras que para las de mayor profundidad se incorporaron progresivamente sus distintos segmentos.

La velocidad media estimada de cada dovela se obtuvo a partir del promedio de la distribución de velocidades comprendida entre el lecho y su profundidad media. Para ello, el área bajo el perfil correspondiente a cada profundidad se determinó mediante la suma de las áreas triangulares y trapezoidales formadas entre los puntos conocidos, de acuerdo con:

$$v_{mi} = \frac{1}{y_i} \int_0^{y_i} v(z) dz$$

Donde:

- v_{mi} = Velocidad media estimada de la dovela i (m/s).
- y_i = Profundidad media de la dovela i (m).
- $v(z)$ = Velocidad correspondiente a una determinada posición del perfil (m/s).
- z = Altura medida a partir del lecho (m).

Como ejemplo del procedimiento, para la primera dovela, comprendida entre las estaciones P-0 y P-1, se obtuvo una profundidad media de:

$$y_1 = \frac{0.00 \text{ m} + 2.35 \text{ m}}{2} = 1.175 \text{ m}$$

Y un área parcial de:

$$a_1 = (5.00 \text{ m})(1.175 \text{ m}) = 5.875 \text{ m}^2$$

Debido a que esta profundidad se encuentra entre las alturas de 0.20 y 2.09 m del perfil de referencia, la velocidad correspondiente a una altura de 1.175 m se determinó mediante interpolación lineal entre las velocidades registradas en dichos puntos:

$$V_{1.175} = 0.0218 \text{ m/s} + \left(\frac{0.0769 \text{ m/s} - 0.0218 \text{ m/s}}{2.09 \text{ m} - 0.20 \text{ m}} \right) (1.175 \text{ m} - 0.20 \text{ m})$$

Obteniéndose:

$$V_{1.175} = 0.0502 \text{ m/s}$$

El área bajo el perfil hasta esta altura se obtuvo mediante la suma del área triangular comprendida entre 0 y 0.20 m y el área trapezoidal comprendida entre 0.20 y 1.175 m:

$$A_{v1.175} = \frac{(0.20 \text{ m})(0.0218 \text{ m/s})}{2} + \left(\frac{0.0218 \text{ m/s} + 0.0502 \text{ m/s}}{2} \right) (1.175 \text{ m} - 0.20 \text{ m})$$

De donde:

$$A_{v1.175} = 0.0373 \text{ m}^2/\text{s}$$

Por lo tanto, la velocidad media estimada para la primera dovela fue:

$$v_{m1} = \frac{0.0373 \text{ m}^2/\text{s}}{1.175 \text{ m}} = 0.0317 \text{ m/s}$$

El mismo procedimiento se aplicó a las dovelas restantes, utilizando en cada caso la profundidad media correspondiente y el segmento aplicable del perfil de referencia. Para la dovela 9, comprendida entre P-8 y P-9, cuya profundidad media de 4.14 m supera en 0.05 m la profundidad utilizada como referencia en P-6 (4.09 m), se prolongó linealmente el último segmento del perfil hasta alcanzar la profundidad requerida.

Una vez obtenida la velocidad media estimada para cada dovela, su gasto parcial se calculó mediante:

$$q_i = a_i \cdot v_{mi}$$

Donde:

- q_i = Gasto parcial de la dovela i (m^3/s).
- a_i = Área parcial de la dovela i (m^2).
- v_{mi} = Velocidad media estimada de la dovela i (m/s).

Finalmente, el gasto total de la sección se determinó mediante la suma de los gastos parciales:

$$Q = \sum_{i=1}^{13} q_i$$

Los valores de profundidad media, área parcial, velocidad media estimada y gasto parcial correspondientes a las 13 dovelas se presentan en la Tabla 34.

Estimación del Gasto en la Sección Transversal del río San Juan							
Ubicación: <u>China, Nuevo León</u>							
Fecha de Levantamiento: <u>1-October-2021</u>							
Dovela			Sección			Velocidad Media Estimada (m/s)	Gasto Parcial (m³/s)
Nº	Estación Inicial	Estación Final	Ancho (m)	Profundidad Media (m)	Área Parcial (m²)		
1	P-0	P-1	5.00	1.175	5.875	0.0317	0.186
2	P-1	P-2	5.00	2.675	13.375	0.0541	0.724
3	P-2	P-3	5.00	2.985	14.925	0.0583	0.870
4	P-3	P-4	5.00	3.285	16.425	0.0623	1.023
5	P-4	P-5	5.00	3.835	19.175	0.0695	1.333
6	P-5	P-6	5.00	4.080	20.400	0.0727	1.483
7	P-6	P-7	5.00	3.995	19.975	0.0716	1.430
8	P-7	P-8	5.00	4.000	20.000	0.0716	1.432
9	P-8	P-9	5.00	4.140	20.700	0.0734	1.519
10	P-9	P-10	5.00	4.000	20.000	0.0716	1.432
11	P-10	P-11	5.00	3.145	15.725	0.0604	0.950
12	P-11	P-12	5.00	2.185	10.925	0.0471	0.515
13	P-12	P-13	5.00	0.950	4.750	0.0281	0.133
Área Hidráulica Total =						202.25 m²	
Gasto Total Estimado =						13.030 m³/s	

Tabla 34. Estimación del gasto en la sección transversal del río San Juan (elaboración propia, 2022).

La suma de los gastos parciales proporcionó un gasto total estimado de:

$$Q = 13.03 \text{ m}^3/\text{s}$$

Este valor representa el gasto estimado para las condiciones hidráulicas presentes en la sección del río San Juan durante el levantamiento realizado el 1 de octubre de 2021.

4.5.3 Balance hídrico diario del embalse

Con el propósito de obtener un parámetro independiente de comparación con el gasto estimado en la sección del río San Juan, se realizó un balance hídrico del embalse para un intervalo de 24 horas, comprendido entre los días del 1 y 2 de octubre de 2021. La selección de este periodo permitió analizar el comportamiento volumétrico del embalse durante el día en que se efectuó el levantamiento de campo.

El balance se desarrolló con base en el procedimiento establecido en el subcapítulo 4.4, adaptando las componentes hidrológicas y operativas a una escala diaria. Para ello se consideraron el escurrimiento superficial, la precipitación directa sobre el embalse, la evaporación, las extracciones destinadas al abastecimiento y riego, así como los registros de almacenamiento correspondientes al inicio y final del periodo. No se registraron operaciones de trasvase durante el intervalo analizado.

A diferencia del balance anual, las filtraciones no se incorporaron como una salida previamente definida, debido a que el objetivo de este análisis fue determinar la diferencia entre la variación del almacenamiento estimada a partir de las componentes conocidas y la observada en los registros oficiales. De esta manera, el residual obtenido constituye una estimación independiente que posteriormente puede contrastarse con el gasto determinado a partir de las mediciones realizadas en el río San Juan.

Para establecer las condiciones inicial y final del balance se utilizaron los registros oficiales de almacenamiento del embalse correspondientes al 1 y 2 de octubre de 2021, mostrados en la Tabla 35. A partir de estos valores, la variación del almacenamiento se determinó mediante:

$$\Delta S_{Obs} = S_f - S_i$$

Donde S_i y S_f corresponden a los almacenamientos registrados al inicio y al final del intervalo, respectivamente. Debido a que el almacenamiento disminuyó durante las 24 horas analizadas, la variación obtenida presentó un valor negativo.

Variación del Almacenamiento Observada en los Registros de la Presa El Cuchillo		
Fecha: <u>1-Oct-2021 al 2-Oct-2021</u>		
Parámetro	Volumen Diario	
	m ³	hm ³
Volumen almacenado inicial (1/10/2021)	604,602,000.00	604.602
Volumen almacenado final (2/10/2021)	603,790,000.00	603.790
Variación del Almacenamiento Observada (ΔS_{Obs})	-812,000.00	-0.812

Tabla 35. Registros de almacenamiento de la presa El Cuchillo utilizados para el balance hídrico diario (elaboración propia, 2022).

Para la precipitación y evaporación se utilizaron los registros de la estación meteorológica El Cuchillo. Debido a que las lecturas se realizan diariamente a las 08:00 h y representan las condiciones acumuladas durante las 24 horas anteriores, se emplearon los valores reportados el 2 de octubre de 2021 como representativos del periodo comprendido entre ambas lecturas de almacenamiento. Para este intervalo se registró una precipitación de 0.00 mm y una evaporación de 3.88 mm.

Al no registrarse precipitación, su contribución volumétrica fue igual a cero. El volumen correspondiente a la evaporación se obtuvo mediante el producto del área del espejo de agua considerada para el periodo y la lámina registrada corregida (Tabla 36), esta última corregida mediante un coeficiente de corrección $K_p=0.70$.

Volumen Diario de Precipitación y Evaporación sobre el Embalse					
Presa: <u>El Cuchillo - Solidaridad</u>					
Fecha: <u>1-October-2021</u>					
Concepto	Valor Acumulado Diario		Valor Corregido (m)	Área del Embalse (m ²)	Volumen Diario (m ³)
	(mm)	(m)			
Precipitación	0.00	0.00	-	92,833,860	0.00
Evaporación	3.88	0.00388	0.00272	92,833,860	252,508.10

Tabla 36. Volumen diario de precipitación directa y evaporación sobre el embalse (elaboración propia, 2022).

Para el escurrimiento superficial se utilizaron los registros de gasto medio diario de la estación hidrométrica Las Enramadas, ubicada sobre el río San Juan aguas arriba del

embalse, cuyos valores fueron de 10.28 m³/s para el 1 de octubre y 8.91 m³/s para el 2 de octubre. Debido a la proximidad temporal entre ambos registros y al carácter diario de la información, se adoptó su promedio como gasto representativo del intervalo analizado; a partir de este valor, el volumen correspondiente al escurrimiento superficial se obtuvo mediante el producto del gasto medio diario promedio por el tiempo considerado (Tabla 37), equivalente a 86,400 segundos o 24 horas.

Volumen Diario de Escorrentía Superficial			
Presa: <u>El Cuchillo - Solidaridad</u>			
Fecha: <u>1-October-2021</u>			
Concepto	Gasto Medio Diario Promedio (m ³ /s)	Tiempo de Ocurrencia (seg)	Volumen Diario (m ³)
Escorrentimiento Superficial	9.595	86,400	829,008.00

Tabla 37. Volumen diario de escorrentía superficial (elaboración propia, 2022).

Para las extracciones se utilizó el gasto total de 5.89 m³/s reportado en los registros operativos de CONAGUA, el cual integra las tres obras de toma de la presa: los acueductos El Cuchillo–Monterrey y China–Los Aldama, destinados al abastecimiento de agua potable, y la toma correspondiente al Distrito de Riego Las Lajas. Debido a que el registro disponible presenta estos usos de manera conjunta, se consideraron como una sola componente del balance, manteniendo el gasto constante durante las 24 horas y transformándolo a volumen diario, cuyo resultado se presenta en la Tabla 38.

Volumen Diario de Extracción			
Presa: <u>El Cuchillo - Solidaridad</u>			
Fecha: <u>1-October-2021</u>			
Concepto	Gasto Medio Diario (m ³ /s)	Tiempo de Ocurrencia (seg)	Volumen Diario (m ³)
Extracción por Obras de Toma: * Acueducto El Cuchillo-Monterrey * Acueducto China-Los Aldama * Distrito de Riego Las Lajas	5.89	86,400	508,896.00

Tabla 38. Volumen diario de extracción mediante las obras de toma (elaboración propia, 2022).

Por otra parte, al no registrarse operaciones de trasvase durante el intervalo analizado, esta componente se consideró igual a cero.

Una vez determinadas las componentes correspondientes al periodo de análisis, se calculó la variación estimada del almacenamiento mediante:

$$\Delta S_{BH} = V_{Esc} + V_P - V_{Evap} - V_{Ext} - V_T$$

Donde:

- ΔS_{BH} = Variación del almacenamiento estimada mediante el balance hídrico (m³).
- V_{Esc} = Volumen de escorrentía superficial (m³).
- V_P = Volumen de precipitación directa sobre el embalse (m³).
- V_{Evap} = Volumen perdido por evaporación (m³).
- V_{Ext} = Volumen de extracciones mediante las obras de toma (m³).
- V_T = Volumen correspondiente a trasvases (m³).

A partir de los valores correspondientes a cada uno de los componentes del balance para el periodo analizado, se realizó su integración y se obtuvieron los resultados presentados en la Tabla 39.

Balance Hídrico del Embalse de la Presa El Cuchillo		
Fecha: <u>1-Oct-2021 al 2-Oct-2021</u>		
Parámetro	Volumen Diario	
	m³	hm³
Escorrentía	+829,008.00	+0.829
Precipitación	0.00	0.00
Evaporación	-252,508.10	-0.253
Extracción para Abastecimiento y Riego	-508,896.00	-0.509
Trasvase	0.00	0.00
Filtraciones	-	-
Variación del Almacenamiento (ΔSBH)	+67,603.90	+0.068

Tabla 39. Balance hídrico del embalse de la presa El Cuchillo para el periodo comprendido entre el 1 y 2 de octubre de 2021 (elaboración propia, 2022).

Posteriormente, la diferencia entre la variación estimada mediante el balance y la variación observada en los registros de almacenamiento se determinó mediante:

$$\Delta S_R = \Delta S_{Obs} - \Delta S_{BH}$$

Donde:

- ΔS_R = Diferencia residual del balance.
- ΔS_{Obs} = Variación del almacenamiento observada en los registros.
- ΔS_{BH} = Variación del almacenamiento estimada mediante el balance hídrico.

Los valores empleados para cada componente y el resultado obtenido se presentan en la Tabla 40.

Comparación de las Estimaciones de la Variación del Almacenamiento del Embalse de la Presa El Cuchillo		
Fecha: <u>1-Oct-2021 al 2-Oct-2021</u>		
Concepto	Volumen	
	(m³)	(hm³)
Variación del almacenamiento del balance hídrico (ΔS_{BH})	+67,603.90	+0.068
Variación del almacenamiento observada en los registros (ΔS_{Obs})	-812,000.00	-0.812
Diferencia Residual del Balance (ΔS_R)	-879,603.900	-0.880

Tabla 40. Comparación de las estimaciones de la variación del almacenamiento del embalse de la presa El Cuchillo (elaboración propia, 2022).

La comparación dio como resultado una diferencia residual de $-883,045.63 \text{ m}^3$ durante el periodo analizado, cuyo signo negativo indica que la disminución observada en el almacenamiento fue mayor que la estimada a partir de las entradas y salidas consideradas. Por lo tanto, para expresar esta diferencia en términos de pérdida volumétrica, se consideró su valor absoluto:

$$V_R = |\Delta S_R|$$

Obteniéndose:

$$V_R = 879,603.90 \text{ m}^3$$

Finalmente, este volumen se transformó a un gasto medio equivalente mediante:

$$Q_R = \frac{V_R}{86,400}$$

De donde:

$$Q_R = \frac{879,603.90 \text{ m}^3}{86,400}$$

$$Q_R = 10.18 \text{ m}^3/\text{s}$$

Este valor representa el gasto medio equivalente asociado al residual del balance hídrico diario y constituye un parámetro independiente para su posterior comparación con el gasto estimado mediante las mediciones realizadas en el río San Juan.

4.5.4 Comparación de los gastos estimados

A partir de los procedimientos desarrollados anteriormente se obtuvieron dos estimaciones independientes para las condiciones analizadas: un gasto de 13.030 m³/s mediante el procedimiento sección-velocidad aplicado en el río San Juan y un gasto equivalente de 10.18 m³/s asociado al residual del balance hídrico diario de la presa El Cuchillo. Ambos resultados, así como la diferencia entre sus magnitudes, se presentan en la Tabla 41.

Comparación de los Gastos Estimados		
Procedimiento	Periodo	Gasto Estimado (m³/s)
Sección-velocidad en el río San Juan	1/Oct/2021	13.03
Balance hídrico diario del embalse de la presa El Cuchillo	1-2/Oct/2021	10.18
Diferencia Absoluta		2.85

Tabla 41. Comparación de los gastos estimados mediante el levantamiento de campo y el balance hídrico diario para las condiciones del 1 de octubre de 2021 (elaboración propia, 2022).

La comparación muestra que ambos valores se encuentran dentro del mismo orden de magnitud, con una diferencia absoluta de $2.85 \text{ m}^3/\text{s}$. Esta proximidad constituye un elemento de contraste entre el gasto estimado a partir de las condiciones hidráulicas observadas en el cauce y el obtenido de manera independiente mediante el balance hídrico diario. No obstante, debido a que ambos procedimientos responden a escalas temporales y fuentes de información diferentes, esta correspondencia no implica una equivalencia directa entre el caudal circulante en el río y el volumen residual del balance.

En este sentido, el gasto obtenido mediante el procedimiento sección-velocidad representa una aproximación a las condiciones presentes durante el levantamiento, debido a que la distribución de velocidades en la sección se estimó a partir de las tres mediciones realizadas en la vertical P-6. Por su parte, el balance hídrico diario depende de la representatividad y precisión de los registros utilizados, mientras que su residual integra la diferencia no explicada por las componentes consideradas y, por tanto, no constituye por sí mismo una medición directa de las filtraciones.

A pesar de estas consideraciones, la aplicación de ambos procedimientos permitió disponer de dos estimaciones independientes para contrastar el orden de magnitud del flujo observado aguas abajo y de las pérdidas no explicadas por el balance del embalse. La posible relación entre estos resultados y las filtraciones de la presa, así como el análisis de la diferencia obtenida y sus implicaciones dentro del comportamiento hidrológico del sistema, se desarrollan en el capítulo de análisis y discusión de resultados.

CAPÍTULO 5. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

5.1 Distribución espacial y evolución de las filtraciones

A partir de la documentación y delimitación de las zonas con manifestaciones de saturación hídrica se analizó la distribución espacial de las filtraciones aguas abajo de la cortina y del dique de la presa El Cuchillo. Para ello se compararon las condiciones observadas en 2009, 2019 y 2021, correspondientes a diferentes niveles de almacenamiento del embalse. Las imágenes utilizadas fueron seleccionadas considerando su resolución y condiciones de precipitación nula o escasa, con la finalidad de reducir la influencia de lluvias recientes en la identificación de superficies húmedas. **Las cartas de filtraciones elaboradas para cada año y sector se presentan de manera completa en el Anexo II**, mientras que en este apartado se muestran de forma integrada los resultados de la comparación espacial.

Distribución espacial de las zonas con saturación hídrica

La delimitación realizada muestra que las manifestaciones de saturación hídrica se distribuyen tanto aguas abajo de la cortina como del dique, aunque con características espaciales diferentes. En el sector de la cortina, las áreas identificadas se extienden hacia la cabecera municipal de China y sus alrededores, donde la presencia de infraestructura y zonas urbanizadas limita parcialmente la observación directa de las características superficiales empleadas durante la fotointerpretación. En contraste, aguas abajo del dique predominan terrenos con menor cobertura urbana, lo que permitió reconocer con mayor continuidad los cambios de tono, textura, vegetación y humedad asociados con las superficies saturadas.

La comparación de los polígonos delimitados para 2009, 2019 y 2021 permite identificar zonas que permanecen afectadas en los diferentes periodos y otras cuya extensión presenta variaciones (Figura 72 y 73). Los sectores representados como humedales constituyen las manifestaciones más persistentes, aunque su extensión puede variar entre las imágenes. Alrededor de éstos se reconocen superficies con saturación hídrica cuyos límites muestran expansiones o contracciones entre las fechas analizadas.

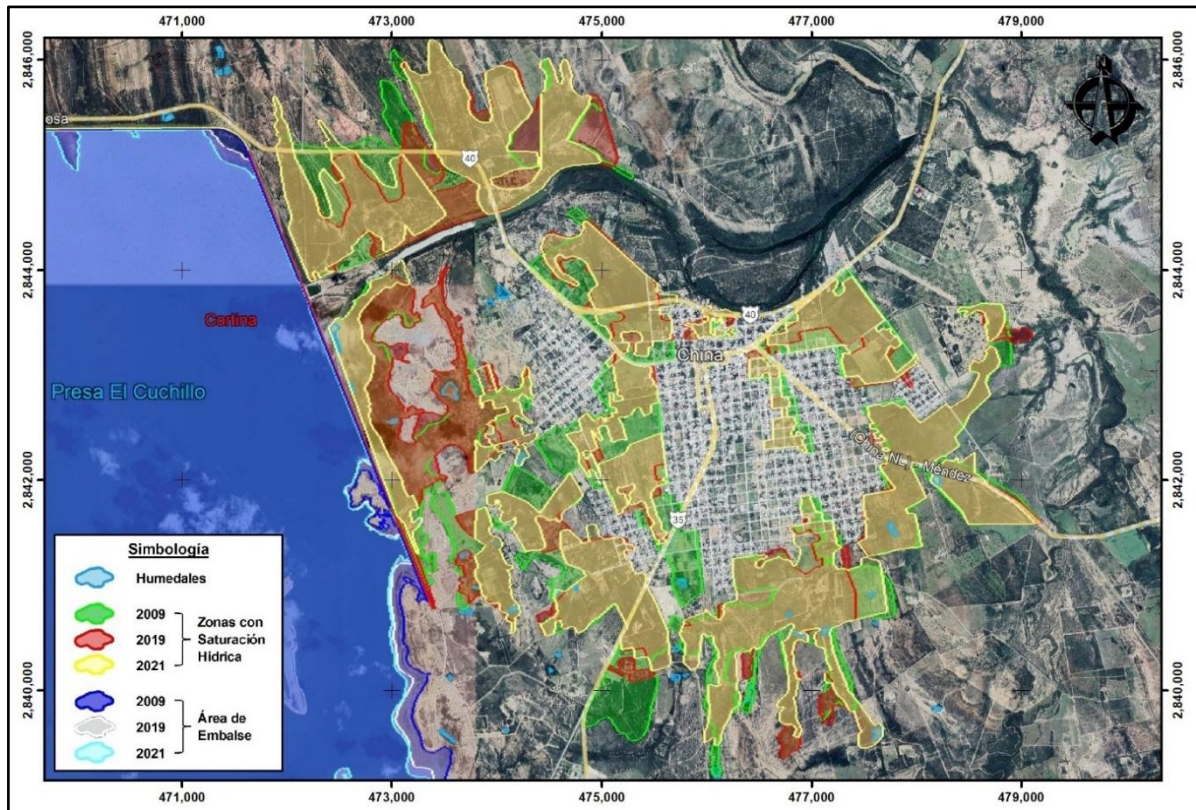


Figura 72. Distribución espacial de las áreas con saturación hídrica para los años 2009, 2019 y 2021: aguas abajo de la cortina (elaboración propia a partir de imagen satelital de Google Earth Pro, 2021).

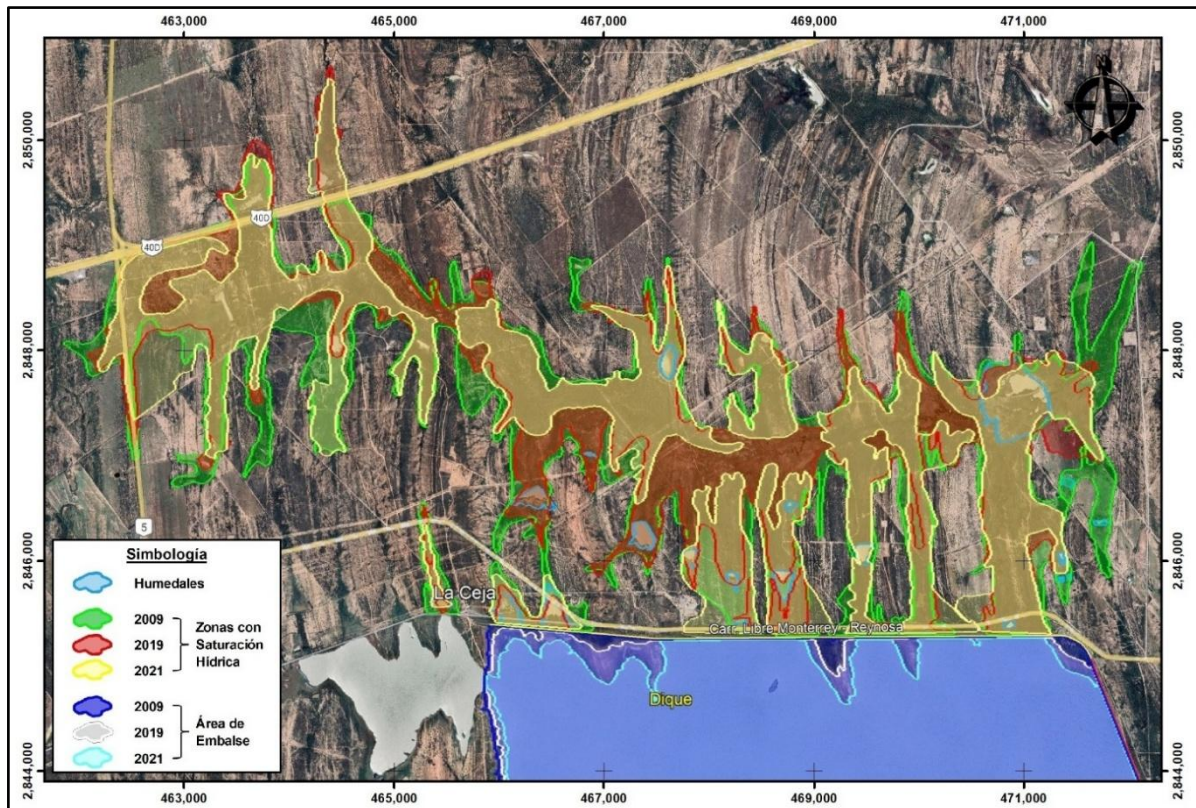


Figura 73. Distribución espacial de las áreas con saturación hídrica para los años 2009, 2019 y 2021: aguas abajo del dique (elaboración propia a partir de imagen satelital de Google Earth Pro, 2021).

La superposición de las delimitaciones permite observar que las áreas afectadas no presentan una configuración espacial completamente distinta entre un periodo y otro; por el contrario, existe recurrencia en diversos sectores, acompañada de cambios en su extensión. Este comportamiento indica la presencia de zonas donde las manifestaciones de humedad son persistentes y de otras cuya expresión superficial es variable bajo las diferentes condiciones analizadas.

Las observaciones realizadas en campo respaldaron la interpretación de las imágenes satelitales. En las zonas identificadas se reconocieron terrenos con espejo de agua visible, áreas donde la presencia de tule evidenciaba condiciones permanentes o prolongadas de humedad, así como suelos con tonalidades oscuras asociadas con saturación. También se observaron viviendas con evidencias de humedad y ensalitramiento en sus muros. Estas observaciones permitieron establecer criterios de referencia para reconocer características similares en otros sectores mediante la fotointerpretación.

Variación de las áreas con saturación hídrica y condiciones del embalse

Las superficies delimitadas muestran una disminución progresiva entre las tres condiciones observadas, coincidente con la reducción del almacenamiento y de la superficie del embalse. En la Tabla 42 se presentan las condiciones correspondientes a cada fecha y las superficies obtenidas para los sectores de la cortina y del dique.

Condiciones del Embalse de la Presa El Cuchillo y Áreas con Saturación Hídrica						
Fecha	Condiciones del Embalse			Áreas con Saturación Hídrica		
	Almacenamiento (hm³)	Llenado respecto al NAME (%)	Área del Embalse (Km²)	Aguas abajo de la cortina (Km²)	Aguas abajo del dique (Km²)	Área Total (Km²)
01/03/2009	1,372.370	76.91%	141.769	13.711	14.392	28.103
01/07/2019	830.094	46.52%	116.698	11.451	11.081	22.532
10/08/2021	638.698	35.80%	92.257	9.708	9.930	19.638

Tabla 42. Condiciones del embalse y las áreas con saturación hídrica (elaboración propia, 2022).

En marzo de 2009, cuando el almacenamiento registrado fue de 1,372.370 hm³ y correspondía al 76.91% respecto al NAME, se obtuvo la mayor superficie con saturación hídrica de los periodos analizados, con un total de 28.103 km². Para julio de

2019, con un almacenamiento de 830.094 hm³ y un llenado del 46.52 %, la superficie disminuyó a 22.532 km²; mientras que, en agosto de 2021, con 638.698 hm³ almacenados y un llenado del 35.80 %, se obtuvo la menor extensión, con 19.638 km².

Entre 2009 y 2021, el almacenamiento disminuyó aproximadamente 53.46 %, mientras que el área del embalse pasó de 141.769 a 92.257 km², lo que representa una reducción cercana al 34.92 %. Durante el mismo intervalo, el área total con saturación hídrica disminuyó aproximadamente 30.12 %. Al considerar separadamente los dos sectores, la reducción fue de aproximadamente 29.20 % aguas abajo de la cortina y 31.0 % aguas abajo del dique. La similitud de estas variaciones muestra que ambos sectores presentan un comportamiento concordante ante las diferentes condiciones de almacenamiento, aun cuando su configuración espacial y las condiciones para su identificación son distintas.

La relación entre el almacenamiento, la superficie del embalse y las áreas con saturación hídrica se observa con mayor claridad en la Figura 74. La condición de mayor almacenamiento, correspondiente a 2009, coincide con las mayores superficies del embalse y de saturación hídrica; 2019 presenta valores intermedios para las tres variables, mientras que en 2021 se registran los valores más bajos.

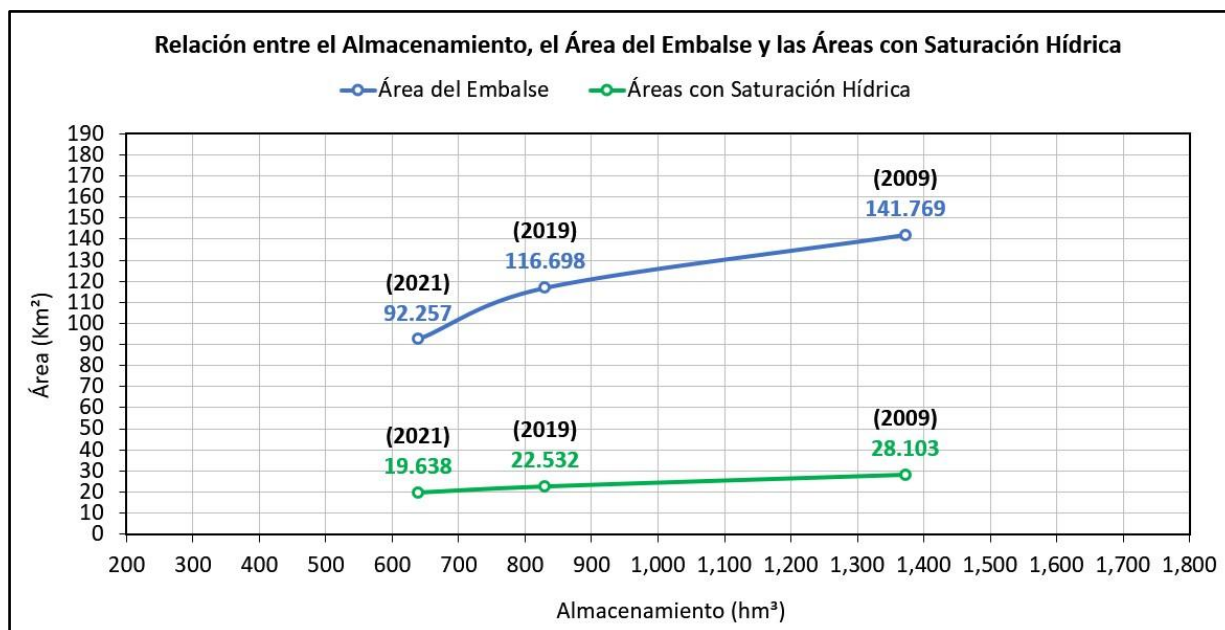


Figura 74. Relación entre el almacenamiento, el área del embalse y las áreas con saturación hídrica (elaboración propia, 2022).

La tendencia observada sugiere una relación entre las condiciones hidráulicas del embalse y la extensión de las manifestaciones superficiales asociadas con las filtraciones. El aumento del volumen almacenado implica una mayor carga hidráulica sobre los materiales que conforman el vaso y su entorno, condición que puede favorecer el movimiento del agua a través de las vías disponibles en el medio geológico. De manera concordante, la condición de mayor almacenamiento analizada presenta la mayor extensión de superficies saturadas, mientras que su disminución coincide con una contracción de dichas áreas.

Sin embargo, esta relación debe interpretarse como una tendencia observada para las condiciones estudiadas y no como una relación estadística o proporcional directa entre el almacenamiento y la superficie afectada, debido al número de periodos disponibles para la comparación y a la intervención de otros factores que controlan el movimiento del agua en el subsuelo. En este sentido, los resultados de la fotointerpretación permiten establecer el comportamiento superficial del fenómeno, pero su interpretación requiere considerar también las características hidrogeológicas del área.

Consideraciones sobre la delimitación de las zonas afectadas

Las superficies obtenidas representan las áreas donde fue posible identificar manifestaciones de saturación hídrica mediante los criterios establecidos en la metodología y su contraste con las observaciones de campo. Esta consideración adquiere especial importancia aguas abajo de la cortina, particularmente dentro de la cabecera municipal de China, donde las construcciones cubren el terreno y dificultan reconocer directamente los cambios de tono, textura, vegetación y humedad utilizados durante la fotointerpretación. En consecuencia, las superficies delimitadas en este sector deben entenderse como las áreas cartográficamente identificables mediante el procedimiento empleado y no necesariamente como la totalidad de la superficie que pudiera encontrarse afectada.

En conjunto, los resultados muestran una distribución recurrente de las manifestaciones de saturación hídrica aguas abajo de la cortina y del dique, acompañada de variaciones en su extensión entre los periodos analizados. La disminución de las superficies delimitadas entre 2009, 2019 y 2021 ocurre de manera concordante con la reducción

del almacenamiento y del área ocupada por el embalse, lo que evidencia una respuesta espacial asociada con las diferentes condiciones hidráulicas de la presa. No obstante, para comprender el desplazamiento del agua y establecer si el comportamiento del flujo subterráneo es consistente con la localización de estas zonas, es necesario incorporar el análisis de la superficie piezométrica.

5.2 Comportamiento piezométrico y régimen del flujo subterráneo

El análisis piezométrico permitió interpretar la configuración regional del agua subterránea en el entorno de la presa El Cuchillo y establecer sus principales direcciones de flujo. Para ello se analizaron las cartas correspondientes a los años 2005, 2006, 2007 y 2009, elaboradas a partir de los niveles piezométricos disponibles para los pozos de observación seleccionados. **Las cartas completas se presentan en el Anexo III**, mientras que en este apartado se muestran individualmente las configuraciones obtenidas para facilitar su comparación e interpretación.

Configuración de la superficie piezométrica

La distribución de las isopiezas muestra un patrón general semejante en los cuatro periodos analizados, en donde las mayores cargas hidráulicas se localizan hacia el sector occidental del área de estudio y disminuyen progresivamente hacia el este, particularmente hacia una zona ubicada aguas abajo de la cortina y próxima a la cabecera municipal de China, N.L. Esta disposición define un gradiente hidráulico regional desde las zonas de mayor hacia las de menor carga.

En 2005, las isopiezas muestran una disminución gradual desde el oeste hacia el sector oriental, donde las curvas adquieren una geometría cerrada alrededor de los menores niveles representados. Las líneas de flujo, trazadas perpendicularmente a las isopiezas, convergen hacia este sector, configurando una zona de menor carga hidráulica cercana al poblado de China, Nuevo León (Figura 75).

En 2006 se conserva una configuración similar. Aunque los valores piezométricos presentan diferencias respecto al año anterior, continúa observándose una disminución de la carga hidráulica hacia el sector oriental y una convergencia de las líneas de flujo alrededor de la misma zona de menor carga (Figura 76).

Para 2007 se mantiene igualmente el patrón regional observado en los años anteriores. Las isopiezas continúan descendiendo hacia el este y las líneas de flujo conservan una orientación preferencial hacia el sector próximo a China, sin evidenciarse modificaciones importantes en la geometría general del sistema (Figura 77).

Para 2009 se observa nuevamente una configuración semejante, caracterizada por mayores niveles piezométricos en el sector occidental y menores niveles hacia la zona ubicada aguas abajo de la cortina. Las líneas de flujo mantienen la convergencia hacia este sector, confirmando la persistencia del patrón identificado en los periodos anteriores (Figura 78).

En conjunto, las cuatro cartas muestran un patrón regional de flujo convergente hacia una depresión piezométrica localizada en el sector oriental del área de estudio, aguas abajo de la cortina y próxima a China. En esta zona las isopiezas presentan una geometría cerrada y aproximadamente concéntrica, por lo que localmente puede reconocerse una configuración radial convergente. Sin embargo, esta geometría no caracteriza a toda la superficie piezométrica, ya que hacia el oeste predominan isopiezas más abiertas que forman parte del gradiente regional dirigido hacia la zona de menor carga.

La separación entre las isopiezas se mantiene relativamente uniforme en buena parte del área analizada, aunque presenta cambios hacia los sectores occidentales de mayor carga y en las proximidades de la depresión piezométrica. De acuerdo con los fundamentos desarrollados en el marco teórico, estas variaciones pueden reflejar cambios en el gradiente hidráulico y también estar condicionadas por diferencias en la transmisividad del medio. Por esta razón, y dado que no se realizó una determinación cuantitativa del gradiente ni de la transmisividad en cada sector, el espaciamiento se interpreta únicamente de manera cualitativa.

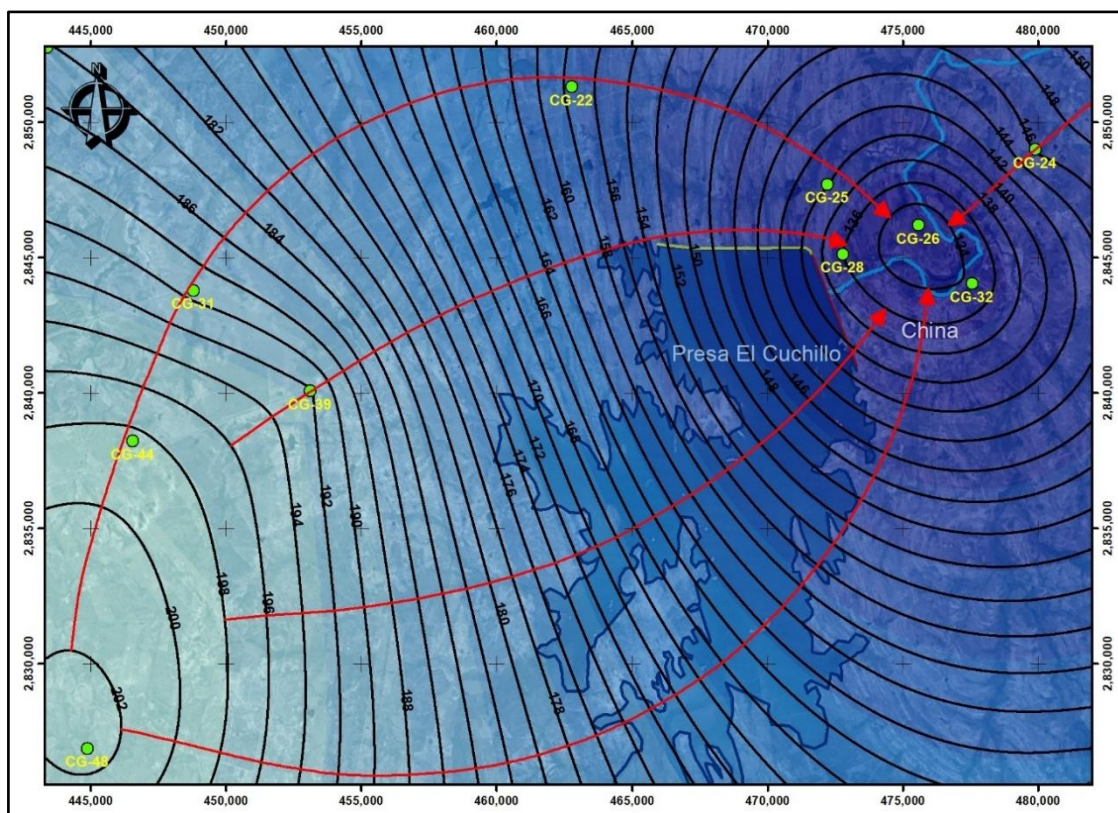


Figura 75. Configuración piezométrica y direcciones de flujo subterráneo en el entorno de la presa El Cuchillo para el año 2005 (elaboración propia, 2021).

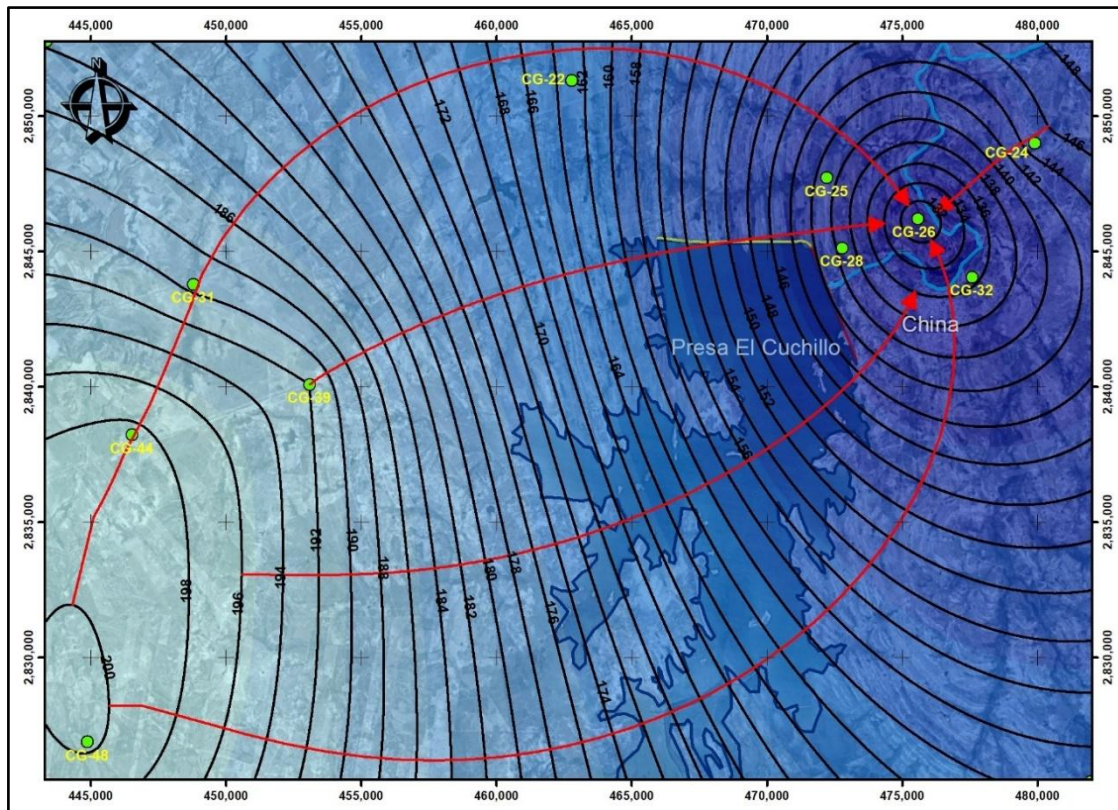


Figura 76. Configuración piezométrica y direcciones de flujo subterráneo en el entorno de la presa El Cuchillo para el año 2006 (elaboración propia, 2021).

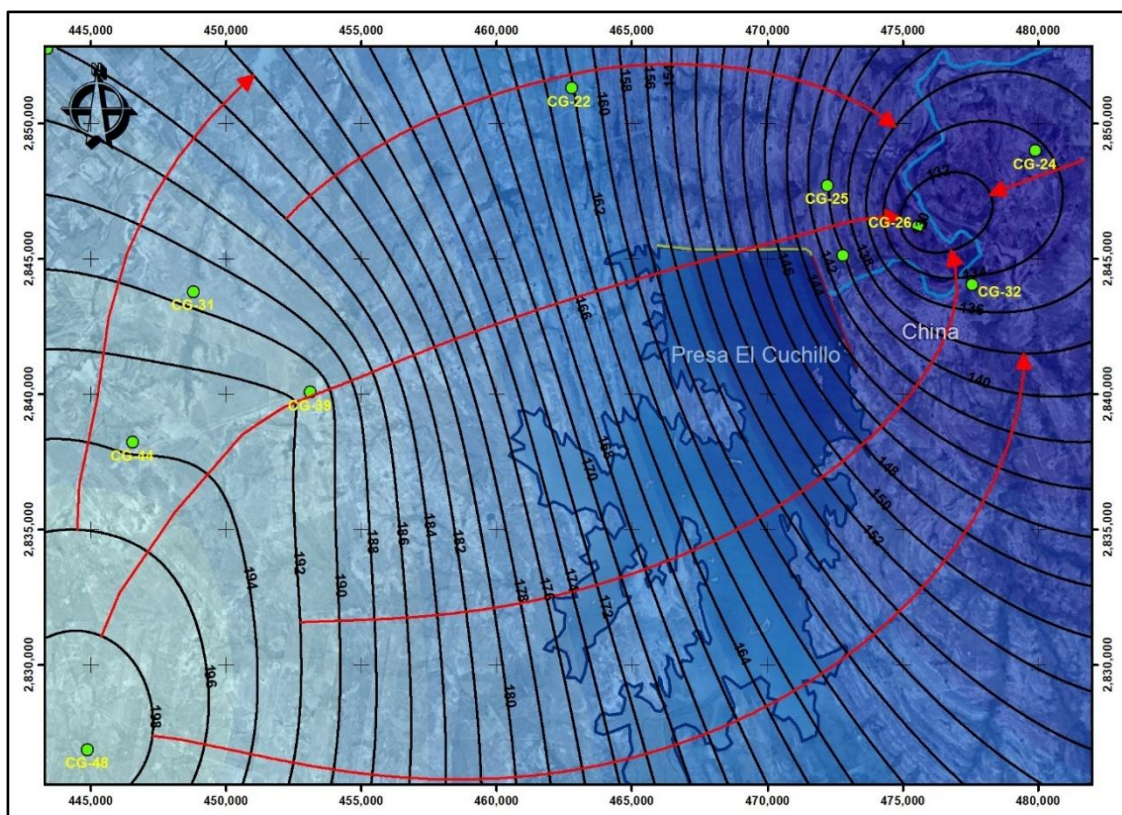


Figura 77. Configuración piezométrica y direcciones de flujo subterráneo en el entorno de la presa El Cuchillo para el año 2007 (elaboración propia, 2021).

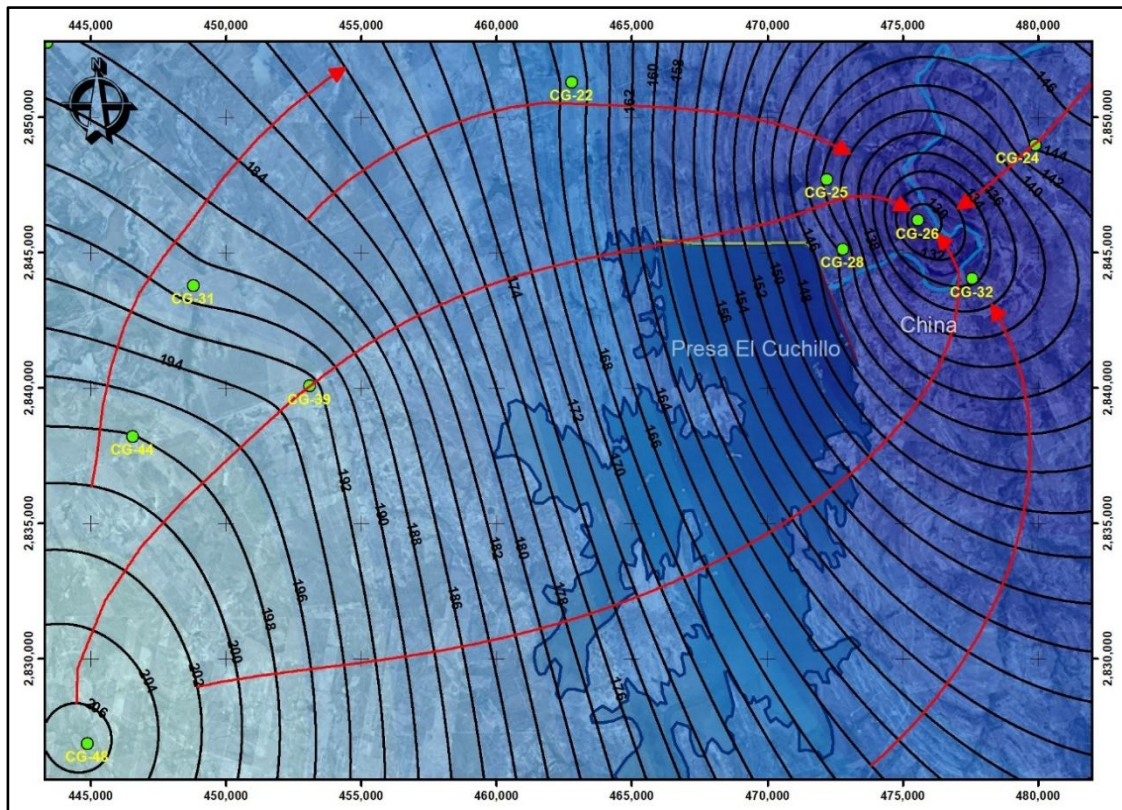


Figura 78. Configuración piezométrica y direcciones de flujo subterráneo en el entorno de la presa El Cuchillo para el año 2009 (elaboración propia, 2021).

Direcciones preferenciales del flujo subterráneo

Las líneas de flujo obtenidas a partir de la configuración de las isopiezas permiten reconocer una tendencia predominante desde las zonas de mayor carga hidráulica hacia el sector de menor carga situado al este de la presa. Esta interpretación es consistente con el principio utilizado para su trazado, según el cual las líneas de corriente se desarrollan aproximadamente perpendiculares a las equipotenciales bajo las condiciones asumidas para el análisis.

La convergencia observada hacia el sector aguas abajo de la cortina constituye uno de los rasgos más importantes del régimen de flujo identificado. Las trayectorias interpretadas desde diferentes sectores del área de estudio tienden a concentrarse alrededor de la depresión piezométrica próxima a China, lo que indica la existencia de una zona hacia la cual se dirige preferentemente el flujo subterráneo regional.

No obstante, la presencia de curvas cerradas y de un patrón convergente no permite establecer por sí sola el mecanismo responsable de esta configuración. Desde el punto de vista hidrogeológico, una geometría de este tipo puede relacionarse con zonas de descarga, interacción con cuerpos de agua superficiales, extracción de agua o cambios en las propiedades hidráulicas del acuífero. Por ello, en esta etapa del análisis resulta más apropiado identificar la zona de convergencia y las direcciones preferenciales de flujo, dejando la interpretación de su relación con las filtraciones, el río San Juan y las condiciones geológicas para el análisis integrado posterior.

Persistencia temporal del régimen de flujo

Las condiciones de almacenamiento del embalse presentaron diferencias importantes entre los cuatro años considerados. En 2005 se registraron 1,596.621 hm³, equivalentes al 89.48 % respecto al NAME; en 2006 el almacenamiento disminuyó a 1,032.052 hm³ (57.84 %); mientras que en 2007 y 2009 alcanzó 1,121.794 hm³ (62.87 %) y 1,119.100 hm³ (62.72 %), respectivamente.

A pesar de estas variaciones, las cartas no muestran cambios sustanciales en la dirección regional del flujo. En todos los periodos se conserva la disminución de la carga hidráulica desde el sector occidental hacia el oriental y la convergencia hacia una zona próxima a China. Esta persistencia sugiere que la geometría general del sistema de

flujo subterráneo se mantiene relativamente estable dentro del periodo analizado, aun bajo diferentes condiciones de almacenamiento del embalse.

Este comportamiento no implica que el volumen almacenado carezca de influencia sobre el régimen hidrogeológico. Las cartas permiten reconocer principalmente la geometría y dirección regional del flujo, pero no cuantifican de manera independiente la respuesta del acuífero ante los cambios de carga hidráulica del embalse. Asimismo, debido a que las superficies fueron obtenidas mediante interpolación Kriging a partir de la información disponible en diez pozos y las líneas de flujo representan una interpretación gráfica regional, los resultados deben considerarse dentro del alcance cualitativo establecido en la metodología.

En conjunto, el análisis piezométrico identifica una dirección preferencial del flujo subterráneo hacia el sector aguas abajo de la cortina, donde se desarrolla una depresión piezométrica persistente durante los cuatro periodos estudiados. La proximidad de esta zona de convergencia con las áreas donde se documentaron manifestaciones superficiales de saturación hídrica constituye un elemento relevante para evaluar la interacción entre el régimen de flujo subterráneo y el fenómeno de filtración. Esta relación se analiza de manera conjunta en el siguiente apartado.

5.3 Relación entre el flujo subterráneo y las zonas de filtración

Los resultados obtenidos mediante la documentación de las filtraciones y el análisis piezométrico permiten evaluar de manera conjunta la distribución de las zonas con saturación hídrica y el comportamiento regional del flujo subterráneo en el entorno de la presa El Cuchillo. Mientras que las cartas de filtraciones permitieron identificar las áreas donde se manifiestan superficialmente condiciones de saturación, las cartas piezométricas proporcionaron información sobre la configuración de la superficie piezométrica y las direcciones preferenciales del flujo subterráneo. La integración de ambos resultados constituye, por lo tanto, un elemento importante para determinar si existe correspondencia espacial entre las zonas afectadas identificadas en superficie y el régimen de circulación del agua subterránea.

Debido a la disponibilidad temporal de la información, el año 2009 fue el único periodo para el cual fue posible integrar directamente ambos conjuntos de resultados. A partir

de esta información se elaboraron dos cartas de integración de filtraciones y piezometría, correspondientes a las zonas aguas abajo de la cortina y del dique. En ellas se superpusieron las zonas con saturación hídrica delimitadas mediante fotointerpretación con las isopiezas y direcciones de flujo obtenidas del análisis piezométrico. **Las cartas completas se presentan en el Anexo IV**, mientras que las Figuras 79 y 80 muestran las áreas centrales utilizadas para su interpretación.

En la zona aguas abajo de la cortina, la configuración piezométrica muestra una disminución de la carga hidráulica desde el sector del embalse hacia el área localizada al este de la cortina y en las proximidades de China y del río San Juan. Las isopiezas presentan una curvatura progresiva hasta configurar una zona de menor carga piezométrica hacia la cual convergen distintas direcciones del flujo subterráneo, comportamiento que coincide espacialmente con una parte importante de las superficies identificadas con saturación hídrica.

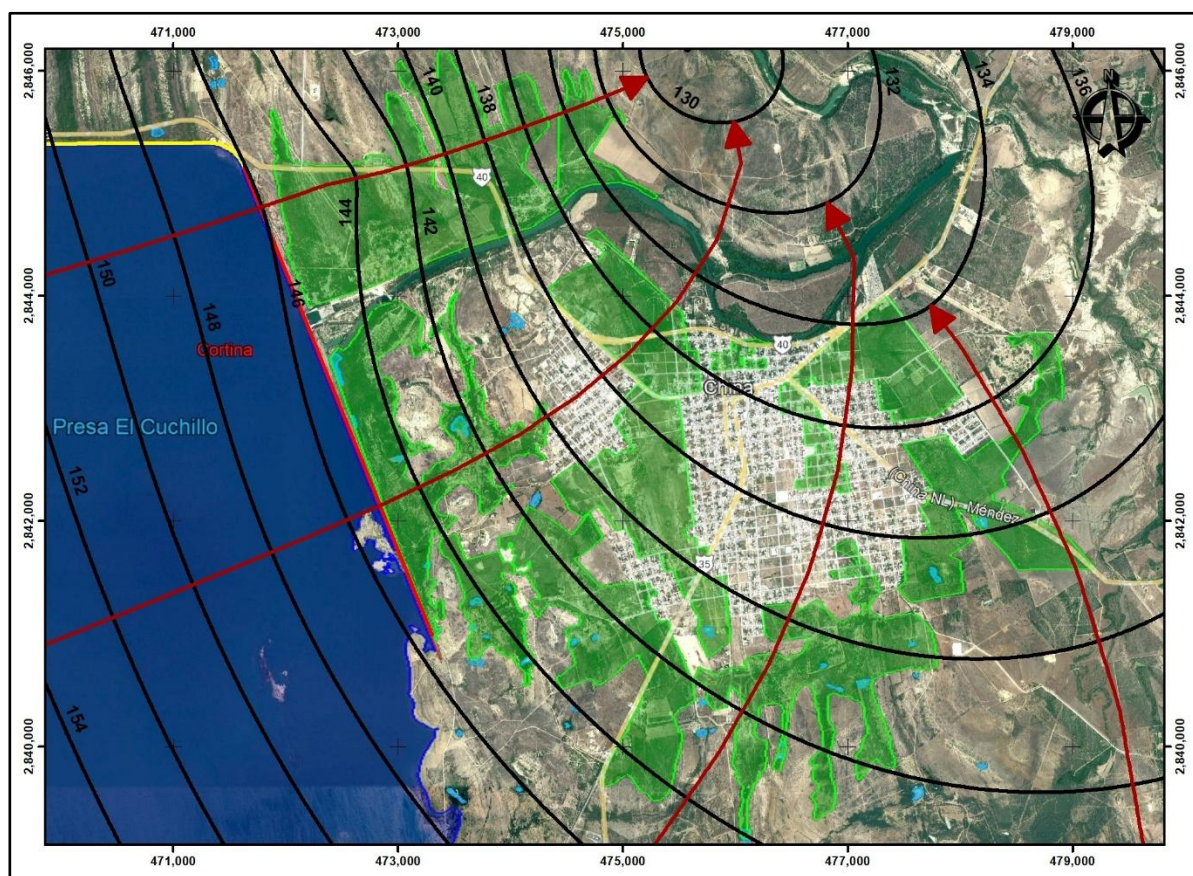


Figura 79. Relación entre la piezometría y las zonas con saturación hídrica aguas abajo de la cortina para 2009 (elaboración propia a partir de imagen satelital de Google Earth Pro, 2021).

Como se observa en la Figura 79, las zonas con saturación hídrica se distribuyen ampliamente aguas abajo de la cortina y alrededor de la localidad de China, dentro de sectores atravesados por las direcciones preferenciales del flujo subterráneo. Esta correspondencia es consistente con las manifestaciones reconocidas durante los recorridos de campo, donde se documentaron suelos húmedos o saturados, presencia de agua superficial, vegetación asociada a condiciones de humedad y problemas de ensalitramiento en algunas viviendas.

En la zona urbana de China debe considerarse que la superficie delimitada mediante fotointerpretación representa únicamente las áreas donde fue posible reconocer los indicadores utilizados para identificar condiciones de saturación. La presencia de viviendas, vialidades y otras construcciones impide observar directamente la respuesta espectral y textural del suelo, por lo que la ausencia de polígonos dentro de algunos sectores urbanizados no necesariamente representa ausencia de humedad o saturación. En este sentido, la configuración piezométrica aporta información complementaria al mostrar que el flujo subterráneo mantiene una tendencia hacia este sector; sin embargo, los datos disponibles no permiten determinar la profundidad del nivel freático ni la extensión de la saturación debajo de las construcciones.

Para la zona aguas abajo del dique se observa una configuración diferente, pero igualmente consistente con la distribución de las áreas identificadas en superficie. Las cargas piezométricas disminuyen progresivamente de oeste a este y definen un gradiente hidráulico regional en esa dirección. Sobre este patrón se distribuyen extensas zonas con saturación hídrica, cuya delimitación fue más clara debido a la menor presencia de construcciones y a la disponibilidad de superficies abiertas para la fotointerpretación.

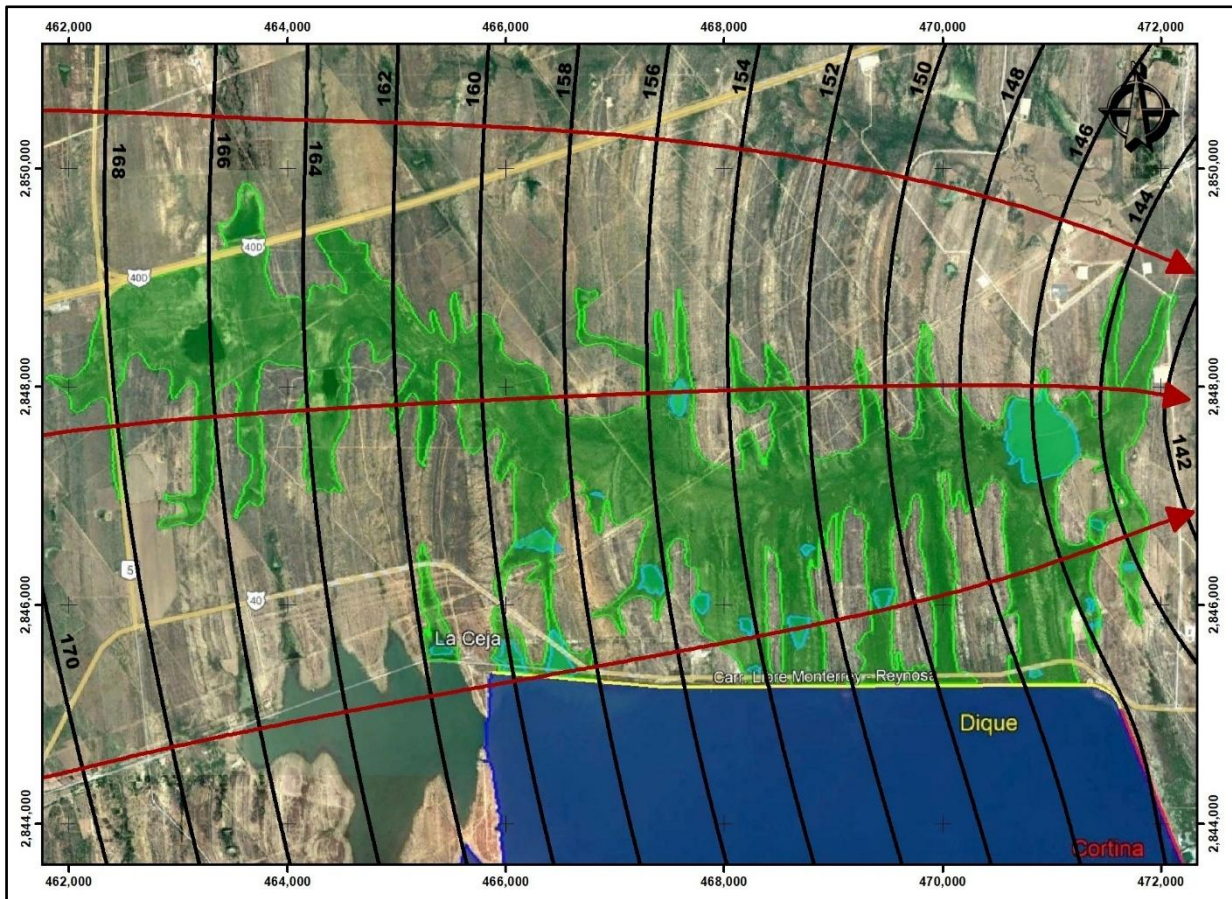


Figura 80. Relación entre la piezometría y las zonas con saturación hídrica aguas abajo del dique para 2009 (elaboración propia a partir de imagen satelital de Google Earth Pro, 2021).

La Figura 80 permite observar que las direcciones interpretadas del flujo subterráneo atraviesan o se encuentran asociadas espacialmente con una proporción importante de las zonas con saturación hídrica. Asimismo, varias de estas superficies presentan una distribución alargada en la dirección general del gradiente hidráulico. Aunque esta geometría no permite establecer por sí sola una conexión hidráulica individual entre el embalse y cada zona saturada, su correspondencia con el patrón piezométrico constituye un elemento adicional para interpretar la circulación del agua en este sector.

La relación observada en ambas zonas es consistente con las características geológicas e hidrogeológicas descritas para el área de estudio. La alternancia de areniscas y lutitas, juntamente con el fracturamiento y otras discontinuidades presentes en el macizo rocoso, genera condiciones de permeabilidad heterogénea que pueden favorecer la circulación del agua. Los estudios hidrogeológicos antecedentes realizados

en la presa también han relacionado estas características litológicas y estructurales con la presencia de filtraciones al pie y aguas abajo de la cortina y del dique. Por lo tanto, la distribución espacial obtenida en este estudio resulta compatible con el modelo hidrogeológico previamente planteado para la zona.

La superposición cartográfica permite establecer que las zonas con saturación hídrica no presentan una distribución independiente del régimen de flujo subterráneo, sino que existe una correspondencia espacial entre ambos elementos. En la zona de la cortina, esta relación se manifiesta mediante la presencia de áreas saturadas dentro y alrededor del sector hacia el cual disminuye la carga piezométrica y convergen las direcciones de flujo; mientras que aguas abajo del dique, las superficies saturadas se distribuyen dentro de un gradiente regional de flujo claramente definido.

Sin embargo, esta correspondencia debe interpretarse considerando las limitaciones de la información disponible. La superposición cartográfica representa las condiciones analizadas para 2009 y la densidad de puntos piezométricos permite caracterizar el comportamiento a escala regional, pero no reconstruir trayectorias individuales de filtración. En consecuencia, los resultados no permiten atribuir directamente cada zona saturada a una trayectoria específica procedente del embalse, aunque sí muestran que su distribución es hidrogeológicamente compatible con el régimen de circulación subterránea determinado mediante la piezometría.

En conjunto, la integración de las cartas de filtraciones y piezométricas proporciona evidencia espacial que fortalece la interpretación del fenómeno de filtración en la presa El Cuchillo. La coincidencia entre las zonas con saturación hídrica, los gradientes piezométricos y las direcciones preferenciales del flujo indica que las manifestaciones observadas aguas abajo de la cortina y del dique forman parte de un sistema hidrogeológico relacionado con la circulación regional del agua subterránea. Estos resultados complementan la variación temporal identificada en el subcapítulo 5.1 y el comportamiento piezométrico analizado en el 5.2, permitiendo establecer una base espacial e hidrogeológica para el análisis posterior de la magnitud de las pérdidas de agua asociadas al sistema.

5.4 Magnitud y comportamiento de las pérdidas por filtración

Con el propósito de analizar las variaciones del almacenamiento de la presa El Cuchillo durante 2021, se compararon los registros del embalse con los resultados obtenidos mediante el balance hídrico desarrollado en el apartado correspondiente de la metodología. Este análisis permite evaluar la correspondencia entre el comportamiento observado del almacenamiento y el estimado a partir de los componentes considerados en el balance, así como identificar la existencia de una diferencia residual entre ambos.

Durante el periodo analizado, el almacenamiento de la presa presentó variaciones importantes, principalmente durante los primeros meses del año. Como se observa en la Tabla 43, el volumen almacenado pasó de 1,081.363 hm³, registrado el 1 de enero de 2021, a 625.709 hm³ al 31 de diciembre del mismo año. Esto representa una disminución neta de 455.654 hm³.

Comportamiento Mensual del Almacenamiento de la Presa El Cuchillo durante 2021			
Ubicación: <u>China, Nuevo León</u>			
Fecha	Elevación del embalse (msnm)	Almacenamiento (hm ³)	Llenado respecto al NAME (%)
1/ene/2021	161.78	1,081.363	60.60%
1/feb/2021	160.12	858.692	48.13%
1/mar/2021	157.82	633.827	35.52%
1/abr/2021	157.59	615.155	34.48%
1/may/2021	157.34	594.860	33.34%
1/jun/2021	157.26	588.366	32.97%
1/jul/2021	157.40	599.731	33.61%
1/ago/2021	157.74	627.332	35.16%
1/sep/2021	157.72	625.709	35.07%
1/oct/2021	157.46	604.602	33.88%
1/nov/2021	157.79	631.391	35.39%
1/dic/2021	157.78	630.580	35.34%
31/dic/2021	157.72	625.709	35.07%

Tabla 43. Comportamiento mensual del almacenamiento de la presa El Cuchillo durante 2021
(elaboración propia, 2022).

La evolución temporal de estos registros se presenta en la Figura 81, en la cual se incorporaron como referencia los niveles correspondientes al NAME, NAMO y NAMINO. Durante los primeros meses se observa una disminución pronunciada del almacenamiento, pasando de 1,081.363 hm³ en enero a 633.827 hm³ en marzo. Este comportamiento estuvo influenciado por los desfoces realizados como consecuencia de las precipitaciones extremas registradas durante el año anterior, efectuados como parte de la operación y seguridad de la presa. Posteriormente, el almacenamiento presentó variaciones de menor magnitud y se mantuvo relativamente estable durante el resto del periodo, principalmente entre aproximadamente 588 y 631 hm³.

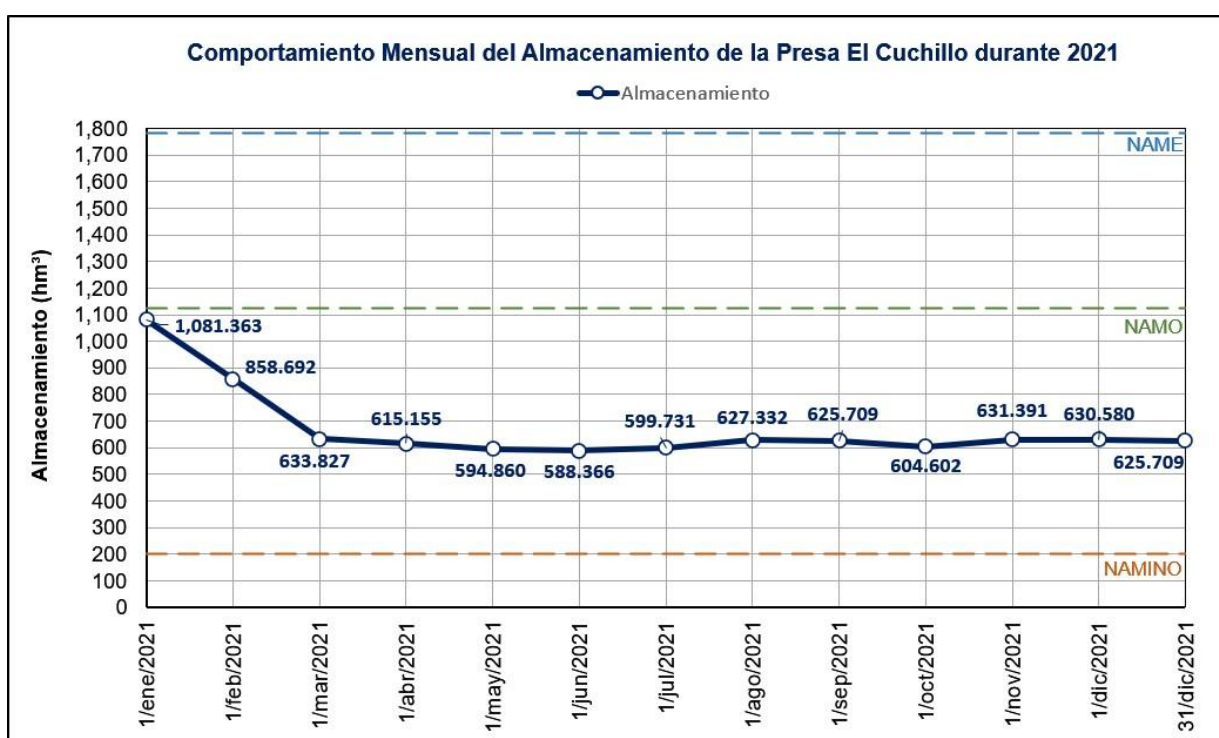


Figura 81. Almacenamiento mensual de la presa El Cuchillo durante 2021 (elaboración propia, 2022).

A partir de este comportamiento se realizó la comparación entre las variaciones mensuales observadas en los registros del embalse y las obtenidas mediante el balance hídrico. Para mantener correspondencia con la discretización temporal utilizada en el balance, se consideraron los almacenamientos registrados al inicio de cada mes, incorporando adicionalmente el registro correspondiente al 31 de diciembre para establecer la condición final del periodo analizado.

En ambos casos se tomó como condición inicial el almacenamiento registrado el 1 de enero de 2021, equivalente a 1,081.363 hm³. A partir de este valor, las variaciones observadas se determinaron mediante las diferencias entre registros consecutivos, mientras que el comportamiento calculado mediante el balance se obtuvo acumulando las variaciones mensuales resultantes de los componentes considerados en éste. La comparación correspondiente se presenta en la Tabla 44.

Variaciones del Almacenamiento Registrado y Calculado mediante Balance Hídrico de la Presa El Cuchillo durante 2021				
Ubicación: <u>China, Nuevo León</u>				
Fecha	Almacenamiento Registrado (hm ³)	Variación del Almacenamiento Registrado (hm ³)	Variación Calculada mediante Balance Hídrico (hm ³)	Diferencia Balance-Registros (hm ³)
1/ene/2021	1,081.363	-	-	-
1/feb/2021	858.692	-222.671	-180.961	41.710
1/mar/2021	633.827	-224.865	-287.348	-62.483
1/abr/2021	615.155	-18.672	-20.082	-1.410
1/may/2021	594.860	-20.295	-7.643	12.652
1/jun/2021	588.366	-6.494	-9.648	-3.154
1/jul/2021	599.731	11.365	52.711	41.346
1/ago/2021	627.332	27.601	76.914	49.313
1/sep/2021	625.709	-1.623	21.244	22.867
1/oct/2021	604.602	-21.107	-7.718	13.389
1/nov/2021	631.391	26.789	35.733	8.944
1/dic/2021	630.580	-0.811	22.941	23.752
31/dic/2021	625.709	-4.871	-5.197	-0.326
Sumatoria		-455.654	-309.056	146.598

Tabla 44. Variaciones del almacenamiento registrado y calculado mediante balance hídrico de la presa El Cuchillo durante 2021 (elaboración propia, 2022).

Los resultados muestran que las variaciones obtenidas mediante ambos procedimientos presentan una correspondencia general en su comportamiento temporal, aunque existen diferencias en su magnitud y, para determinados intervalos, en el sentido de la variación. Durante los primeros meses predominan disminuciones del almacenamiento en ambas estimaciones; posteriormente, entre junio y agosto, se presentan incrementos, aunque éstos resultan de mayor magnitud en el balance

hídrico. En otros periodos, como agosto-septiembre y noviembre-diciembre, las variaciones presentan diferencias incluso en su signo.

Este comportamiento puede observarse con mayor claridad en la Figura 82, donde las dos trayectorias parten del mismo almacenamiento inicial. La línea correspondiente a los registros representa la evolución observada del volumen almacenado, mientras que la obtenida mediante el balance representa el almacenamiento resultante de acumular las variaciones mensuales calculadas. Los valores indicados entre puntos consecutivos corresponden a la variación del almacenamiento durante cada intervalo mensual, donde los valores negativos representan una disminución y los positivos un incremento del volumen.

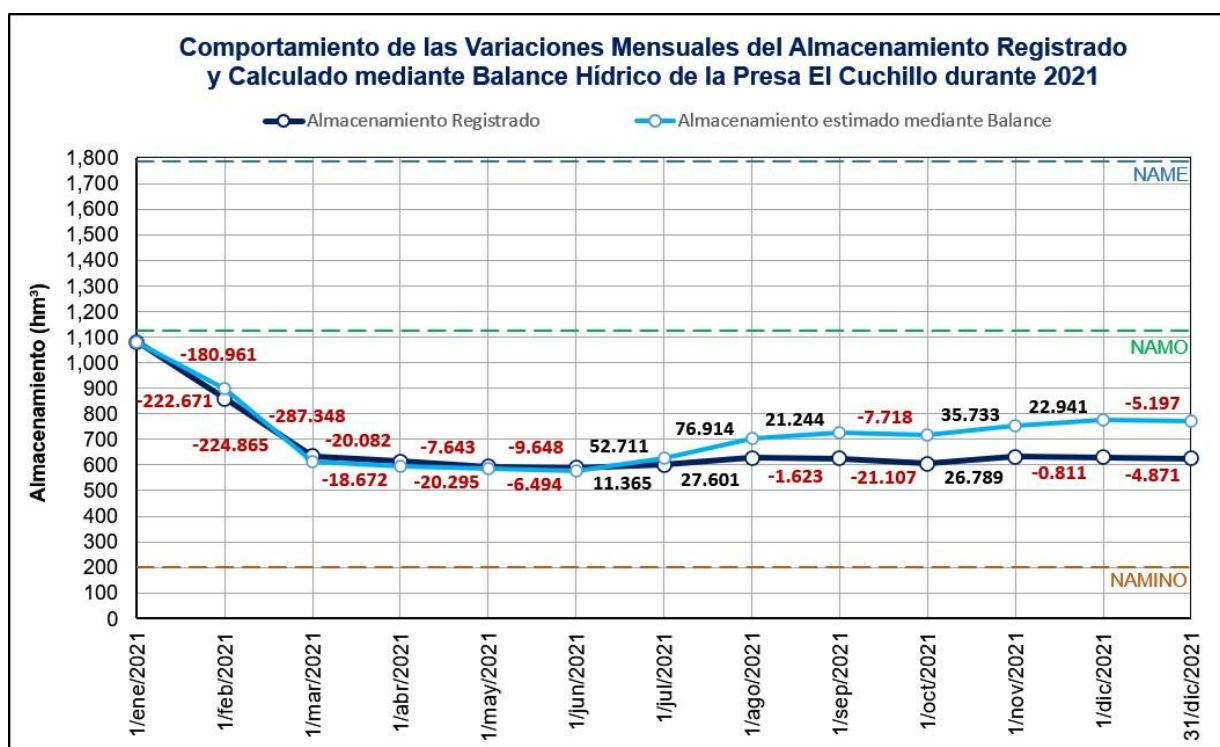


Figura 82. Comportamiento de las variaciones mensuales del almacenamiento registrado y calculado mediante balance hídrico de la presa El Cuchillo durante 2021 (elaboración propia, 2022).

A pesar de las diferencias mensuales, ambas series permiten reconocer tendencias generales semejantes durante diferentes etapas del periodo analizado. Sin embargo, la magnitud de las variaciones no coincide completamente, lo que provoca una separación progresiva entre el almacenamiento observado y el reconstruido mediante el balance.

Esta diferencia resulta particularmente importante porque permite evaluar el volumen que no queda explicado por los componentes incorporados en el balance hídrico.

Al considerar el periodo completo, la variación observada entre el almacenamiento inicial y final fue de 455.654 hm³, equivalente a 455,654,000.000 m³. Por su parte, la variación acumulada obtenida mediante el balance hídrico fue de 309.056 hm³, correspondiente, utilizando el valor completo empleado en los cálculos, a 309,056,156.070 m³. La diferencia entre ambas magnitudes corresponde a 146,597,843.930 m³, equivalentes aproximadamente a 146.598 hm³, como se resume en la Tabla 45.

Balance de la Disminución Anual del Almacenamiento de la Presa El Cuchillo durante 2021		
Concepto	Volumen	
	(m ³)	(hm ³)
Disminución observada en los registros	455,654,000.000	455.654
Disminución calculada mediante el balance hídrico	309,056,156.070	309.056
Diferencia Residual	146,597,843.930	146.598

Tabla 45. Variación anual del almacenamiento de la presa El Cuchillo durante 2021 (elaboración propia, 2022).

La diferencia obtenida representa un volumen residual resultante de la comparación entre la variación del almacenamiento observada y la calculada mediante los componentes considerados en el balance hídrico. Por su naturaleza, este residual no debe interpretarse directamente en su totalidad como un volumen de filtración, sino como una magnitud asociada a las pérdidas identificadas a partir del comportamiento hídrico del embalse. Sin embargo, su valor adquiere especial relevancia al analizarse juntamente con la presencia y persistencia de las zonas con saturación hídrica identificadas mediante fotointerpretación y con el comportamiento del flujo subterráneo determinado mediante el análisis piezométrico, evidencias que permiten considerar a las filtraciones como una componente importante dentro de la diferencia obtenida.

Para establecer un parámetro que permitiera comparar esta diferencia residual con los gastos de filtración disponibles, el volumen obtenido se expresó como un gasto

promedio para el periodo analizado. Considerando los 146,597,843.930 m³ distribuidos durante los 365 días de 2021, se obtiene:

$$Q_{res} = \frac{146,597,843.930 \text{ m}^3}{365 (86,400 \text{ s})}$$

De donde:

$$Q_{res} = 4.65 \text{ m}^3/\text{s}$$

Este valor representa el gasto promedio equivalente asociado al volumen residual del balance, por lo que tampoco debe interpretarse de manera aislada como un gasto de filtración medido directamente. Su utilidad consiste en disponer de una magnitud expresada en unidades de gasto que pueda ser comparada con los valores de filtración disponibles para la presa.

Para dimensionar este resultado, se comparó el gasto equivalente del volumen residual con el gasto de filtración considerado previamente en el balance hídrico, correspondiente a 0.025 m³/s y reportado por CONAGUA. La comparación permite evaluar la magnitud de la diferencia obtenida respecto al valor de filtración incorporado inicialmente en el cálculo.

Comparación de los Gastos asociados a las Filtraciones y al Volumen Residual del Balance Hídrico	
Concepto	Gasto (m ³ /s)
Gasto de filtración considerado en el balance (CONAGUA)	0.025
Gasto equivalente del volumen residual	4.650
Gasto Integrado	4.675

Tabla 46. Comparación entre el gasto de filtración considerado en el balance hídrico y el gasto equivalente del volumen residual (elaboración propia, 2022).

Como se observa en la Tabla 46, el gasto equivalente asociado al volumen residual (4.65 m³/s) resulta considerablemente superior al gasto de filtración considerado en el balance (0.025 m³/s). En términos relativos, el primero equivale aproximadamente a

186 veces el valor utilizado inicialmente, lo que evidencia que el gasto de filtración incorporado al balance representa solamente una fracción de la diferencia determinada entre la variación observada del almacenamiento y la calculada mediante los componentes considerados.

Al integrar ambos valores se obtiene un gasto de 4.675 m³/s. Para efectos de esta investigación, este valor se denomina gasto integrado y representa la suma del gasto de filtración considerado originalmente en el balance y el gasto equivalente correspondiente al volumen residual:

$$Q_{integrado} = Q_{balance} + Q_{residual}$$

De donde:

$$Q_{int} = 0.025 \text{ m}^3/\text{s} + 4.650 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q_{int} = 4.675 \text{ m}^3/\text{s}$$

Es importante señalar que el gasto integrado no constituye una medición directa del caudal de filtración, sino una magnitud obtenida a partir de la integración de dos componentes: el gasto de filtración previamente considerado en el balance hídrico y el gasto equivalente derivado de la diferencia residual determinada durante el periodo analizado. Por esta razón, su interpretación debe realizarse como una estimación asociada al análisis del balance hídrico, y no como un aforo directo de las filtraciones.

No obstante, la magnitud de la diferencia residual adquiere relevancia al relacionarse con los resultados obtenidos en los apartados anteriores. La identificación de zonas con saturación hídrica aguas abajo de la cortina y del dique, así como la correspondencia espacial observada entre dichas zonas y las direcciones del flujo subterráneo, muestran la existencia de condiciones hidrogeológicas compatibles con la circulación y acumulación de agua en estos sectores. En este contexto, el balance hídrico aporta una aproximación cuantitativa complementaria a la evidencia espacial e hidrogeológica previamente analizada.

En conjunto, los resultados indican que la variación observada del almacenamiento durante 2021 no queda completamente explicada por los componentes incorporados al

balance hídrico. El volumen residual de 146.598 hm³, equivalente a un gasto promedio de 4.65 m³/s, constituye por tanto un resultado relevante para evaluar la magnitud de las pérdidas no explicadas durante el periodo de estudio. Su integración con el gasto de filtración previamente considerado conduce a un valor de 4.675 m³/s, que será utilizado posteriormente como referencia para las comparaciones correspondientes dentro del análisis de los efectos de las filtraciones sobre el aprovechamiento del recurso almacenado.

5.5 Análisis comparativo de las estimaciones de gasto

Los resultados obtenidos mediante el balance hídrico diario permitieron identificar diferencias entre las variaciones del almacenamiento registradas y las calculadas a partir de las entradas y salidas consideradas en el balance. Como se analizó en el apartado anterior, estas diferencias dieron lugar a un volumen residual que, expresado como gasto equivalente, representa una componente no explicada por las variables incorporadas en los registros disponibles. Con la finalidad de contar con un parámetro independiente de comparación, se consideró adicionalmente el gasto estimado en el río San Juan mediante el procedimiento de sección-velocidad.

Para establecer una comparación bajo condiciones temporales equivalentes, se consideró el 1 de octubre de 2021, obteniéndose un gasto de 13.03 m³/s en el río San Juan y un gasto equivalente del volumen residual de 10.18 m³/s para el periodo comprendido entre el 1 y 2 de octubre. La diferencia absoluta entre ambos resultados fue de 2.85 m³/s, como se presenta en la Tabla 47.

Comparación de los Gastos Estimados para las Condiciones del 1 de Octubre de 2021		
Procedimiento de Estimación	Periodo de Referencia	Gasto (m ³ /s)
Sección-velocidad en el río San Juan	1/oct/2021	13.03
Balance hídrico diario	1-2/oct/2021	10.18
Diferencia Absoluta		2.85

Tabla 47. Gastos estimados para las condiciones del 1 de octubre de 2021 (elaboración propia, 2022).

La diferencia observada entre ambos valores resulta relevante al tratarse de estimaciones obtenidas mediante procedimientos independientes. No obstante, estos resultados no representan componentes estrictamente equivalentes: el gasto de 13.03 m³/s corresponde al flujo estimado en una sección del río San Juan, mientras que los 10.18 m³/s representan el gasto equivalente de la diferencia residual obtenida mediante el balance hídrico diario. Por esta razón, la comparación no implica que el gasto circulante en el río corresponda en su totalidad al volumen residual, sino que constituye un parámetro independiente para evaluar su orden de magnitud.

La diferencia de 2.85 m³/s entre ambos procedimientos debe analizarse considerando que corresponden a estimaciones obtenidas mediante enfoques distintos. El balance hídrico diario expresa como gasto equivalente la diferencia identificada entre la variación observada del almacenamiento y la calculada a partir de las entradas y salidas consideradas, mientras que el procedimiento de sección-velocidad representa el caudal circulante en una sección determinada del río San Juan bajo las condiciones existentes durante el levantamiento. Asimismo, este último puede integrar aportaciones distintas al agua proveniente de las filtraciones del embalse. En consecuencia, la comparación entre ambos resultados permite establecer una referencia de su orden de magnitud, sin que ello implique una equivalencia estricta entre las dos estimaciones.

La magnitud de los gastos obtenidos adquiere mayor relevancia al compararse con investigaciones previas realizadas en la presa El Cuchillo. Andaverde (1999), a partir del análisis de los mecanismos de filtración asociados con las condiciones geológicas y estructurales del sitio, reportó un gasto de aproximadamente 0.25 m³/s relacionado con las filtraciones presentes en la cortina y el dique. Este valor constituye uno de los primeros antecedentes cuantitativos de las pérdidas de agua asociadas con dichos mecanismos en la presa.

Posteriormente, Lugo (2018) estimó un gasto de 8.53 m³/s en una sección del río San Juan durante condiciones de sequía, el 4 de octubre de 2018, valor que en su investigación fue atribuido a las filtraciones superficiales provenientes de la presa. Para su determinación se consideraron las características de la sección, la pendiente del

cauce y un coeficiente de rugosidad de Manning, y el gasto obtenido fue posteriormente utilizado en la modelación hidráulica realizada con HEC-RAS.

En el mismo estudio, Lugo (2018) analizó los registros históricos proporcionados por CONAGUA y señaló que, a partir de 1998, el volumen registrado como filtración se mantuvo aproximadamente constante en 788,000 m³ anuales. Este volumen representa un gasto medio aproximado de 0.025 m³/s, coincidente con el valor de filtración considerado en los registros utilizados para el balance hídrico del presente estudio. La diferencia entre esta magnitud y los gastos determinados mediante procedimientos independientes evidencia que el valor incorporado como filtración en los registros de operación representa una cantidad considerablemente menor respecto de las magnitudes identificadas en campo o inferidas a partir del comportamiento del almacenamiento.

La Tabla 48 integra los principales valores utilizados para esta comparación, considerando tanto los antecedentes disponibles como los resultados obtenidos en la presente investigación.

Gastos Reportados y Estimados asociados a las Filtraciones de la Presa El Cuchillo		
Fuente / Procedimiento	Gasto (m³/s)	Observaciones
Andaverde (1999)	0.25	Gasto total de filtraciones asociadas con la cortina y del dique
Lugo (2018)	8.53	Gasto atribuido a filtraciones superficiales, estimado en una sección del río San Juan
Balance diario (presente estudio)	10.18	Gasto equivalente del volumen residual del balance hídrico
Sección-velocidad (presente estudio)	13.03	Gasto estimado en el río San Juan

Tabla 48. Comparación de los gastos reportados y estimados asociados al análisis de las filtraciones de la presa El Cuchillo (elaboración propia con información de Andaverde (1999) y Lugo (2018), 2022).

La comparación muestra una diferencia importante entre las magnitudes reportadas. El gasto de 0.25 m³/s señalado por Andaverde (1999) corresponde específicamente a los

mecanismos de filtración estudiados en la cortina y el dique, mientras que los $8.53 \text{ m}^3/\text{s}$ determinados por Lugo (2018) corresponden al gasto estimado en el río San Juan que la autora atribuyó a las filtraciones superficiales. Por su parte, los valores de $10.18 \text{ m}^3/\text{s}$ y $13.03 \text{ m}^3/\text{s}$ obtenidos en esta investigación representan, respectivamente, el gasto equivalente del volumen residual del balance hídrico y el gasto estimado directamente en una sección del río San Juan. Debido a estas diferencias metodológicas y conceptuales, los valores no representan necesariamente una misma componente del sistema hidráulico y, por lo tanto, su comparación debe realizarse considerando el procedimiento y las condiciones bajo las cuales fueron obtenidos.

No obstante, resulta significativo que el gasto estimado por Lugo (2018), el gasto equivalente obtenido mediante el balance diario y el determinado mediante sección-velocidad se encuentren dentro de un orden de magnitud comparable, a pesar de corresponder a años y procedimientos distintos. Este comportamiento contrasta con los valores de $0.025 \text{ m}^3/\text{s}$ considerados como filtración en los registros de CONAGUA y de $0.25 \text{ m}^3/\text{s}$ reportados por Andaverde (1999). En conjunto, los resultados sugieren que el flujo de agua asociado al sistema de filtraciones y a su incorporación hacia las zonas aguas abajo puede alcanzar magnitudes superiores a las representadas por el componente de filtración incluido en los registros utilizados para el balance.

Sin embargo, el volumen residual obtenido mediante el balance hídrico no debe interpretarse en su totalidad como un volumen de filtración, debido a que corresponde a la diferencia resultante entre la variación observada del almacenamiento y la calculada a partir de las entradas y salidas consideradas para el embalse. De forma similar, el gasto determinado en el río San Juan representa el caudal circulante en la sección analizada y puede integrar aportaciones distintas al agua proveniente de las filtraciones. Por ello, ambos resultados constituyen aproximaciones obtenidas desde enfoques diferentes que, al analizarse juntamente con la evidencia espacial y piezométrica, permiten dimensionar la posible contribución de las filtraciones dentro del comportamiento hídrico observado aguas abajo de la presa.

A partir de estas consideraciones, la correspondencia en el orden de magnitud entre los resultados obtenidos mediante procedimientos independientes, junto con la

evidencia espacial e hidrogeológica desarrollada en los apartados anteriores, aporta elementos para sostener que las filtraciones constituyen una componente relevante dentro del funcionamiento hídrico de la presa El Cuchillo. La diferencia identificada entre el almacenamiento observado y el estimado mediante el balance, así como la presencia de un gasto considerable en el río San Juan durante el periodo analizado, justifican considerar estas pérdidas dentro de la evaluación integral del recurso almacenado y de su posible repercusión sobre el volumen disponible para aprovechamiento.

En este sentido, la cuantificación obtenida mediante el balance permite trascender la identificación espacial de las zonas afectadas y aproximarse a la magnitud que estas pérdidas pueden representar respecto al recurso hídrico almacenado. A partir de estos resultados, en el siguiente apartado se analiza su importancia en relación con el suministro de agua asociado a la presa El Cuchillo y las implicaciones derivadas de la presencia de filtraciones en las zonas ubicadas aguas abajo.

5.6 Impacto e implicaciones de las filtraciones

Impacto de las filtraciones en el suministro de agua potable

Una de las principales finalidades de la presa El Cuchillo es el abastecimiento de agua potable a Monterrey y su zona metropolitana. De acuerdo con la memoria descriptiva de la obra, la presa cuenta con una obra de toma específica para este propósito, cuya capacidad de diseño es de 10.00 m³/s. Adicionalmente, la presa abastece a los municipios de China, General Bravo, Doctor Coss y Los Aldamas, así como al Distrito de Riego Las Lajas, por lo que la conservación del volumen almacenado constituye un aspecto relevante para el cumplimiento de los diferentes aprovechamientos para los cuales fue construida.

En el caso del abastecimiento al Área Metropolitana de Monterrey, el gasto de diseño de 10.00 m³/s constituye una referencia para dimensionar la magnitud de las pérdidas identificadas en la presente investigación. Como se determinó mediante el balance hídrico desarrollado para 2021, la diferencia entre la variación del almacenamiento registrada y la calculada a partir de los componentes disponibles produjo un volumen residual anual de 146.598 hm³, equivalente a un gasto promedio de 4.65 m³/s. Aunque este valor no representa una medición directa de las filtraciones y puede incorporar

incertidumbres asociadas con los componentes del balance, los análisis realizados indican que las filtraciones constituyen uno de los procesos que pueden contribuir a explicar una gran parte importante de dicha diferencia.

Al comparar el gasto equivalente del volumen residual con la capacidad de diseño de la obra de toma destinada al abastecimiento de Monterrey, se obtiene la siguiente relación:

$$R = \frac{Q_{residual}}{Q_{proyecto}} \times 100$$

Donde:

- R = Proporción del gasto residual respecto al gasto de diseño.
- $Q_{residual}$ = Gasto equivalente asociado al volumen residual del balance hídrico.
- $Q_{proyecto}$ = Gasto de diseño de la obra de toma El Cuchillo-Monterrey.

Sustituyendo los valores correspondientes:

$$R = \frac{4.65 \text{ m}^3/\text{s}}{10.00 \text{ m}^3/\text{s}} \times 100$$

$$\mathbf{R = 46.5 \%}$$

El resultado indica que el gasto equivalente asociado al volumen residual representa el 46.5 % del gasto de diseño de la obra de toma El Cuchillo–Monterrey. Esta relación permite dimensionar la magnitud de las pérdidas identificadas respecto a uno de los principales aprovechamientos de la presa, particularmente por la importancia que representa el embalse como fuente de abastecimiento para el Área Metropolitana de Monterrey. La comparación entre ambos gastos se presenta en la Tabla 49.

Comparación del Gasto equivalente del Volumen Residual con el Gasto de Diseño de la Obra de Toma		
Concepto	Gasto (m ³ /s)	Proporción respecto al Gasto de Diseño (%)
Gasto de diseño de la obra de toma El Cuchillo–Monterrey	10.00	100%
Gasto equivalente asociado al volumen residual del balance hídrico	4.65	46.5%

Tabla 49. Comparación entre el gasto equivalente del volumen residual y el gasto de diseño para el abastecimiento del Área Metropolitana de Monterrey (elaboración propia, 2022).

La proporción obtenida no implica que el abastecimiento hacia el Área Metropolitana de Monterrey se reduzca directamente en un 46.5 %, debido a que los 10.00 m³/s corresponden a la capacidad de diseño de la obra de toma y no necesariamente al gasto extraído de manera permanente, mientras que los 4.65 m³/s representan el gasto equivalente promedio asociado al volumen residual determinado mediante el balance hídrico. Asimismo, como se discutió previamente, no puede establecerse que la totalidad de este volumen residual corresponda exclusivamente a filtraciones. Por lo tanto, la comparación debe entenderse como una referencia de magnitud que permite dimensionar las pérdidas potenciales identificadas respecto a la capacidad prevista para el abastecimiento.

Esta distinción resulta particularmente importante al analizar las implicaciones sobre el suministro. Las filtraciones no necesariamente se traducen en una disminución inmediata del gasto entregado a Monterrey mientras exista suficiente almacenamiento para satisfacer las extracciones requeridas; sin embargo, representan una salida de agua que no forma parte de los aprovechamientos previstos de la presa y que, en consecuencia, puede disminuir el volumen disponible para su utilización posterior. Su efecto adquiere mayor relevancia durante periodos de sequía o bajos niveles de almacenamiento, cuando la reducción progresiva de las reservas puede limitar la capacidad del sistema para mantener los gastos requeridos durante periodos prolongados.

Actualmente, la conducción del agua desde la presa hacia el Área Metropolitana de Monterrey se realiza mediante los acueductos El Cuchillo-Monterrey I y El Cuchillo-Monterrey II. La incorporación de este último amplió la infraestructura de conducción mediante una segunda línea con capacidad de hasta 5,000 L/s, complementaria a la capacidad del acueducto existente. Esta infraestructura permite conducir en conjunto el gasto correspondiente a la capacidad de diseño de 10.00 m³/s de la obra de toma; por lo tanto, la capacidad de Cuchillo II no debe interpretarse como un gasto adicional a los 10.00 m³/s considerados en el proyecto de la presa.

Desde esta perspectiva, el impacto de las pérdidas sobre el suministro no depende únicamente de su magnitud instantánea, sino de su persistencia y del volumen acumulado que representan. El volumen residual determinado para 2021, de 146.598 hm³, permite apreciar esta condición desde una escala anual: un volumen de esta magnitud que deja de permanecer disponible en el almacenamiento puede adquirir importancia para la gestión del recurso, especialmente ante escenarios en los que las aportaciones al embalse sean reducidas y la demanda de abastecimiento se mantenga elevada. En consecuencia, la reducción potencial del recurso disponible constituye la principal vía mediante la cual las filtraciones pueden incidir en el suministro de agua potable hacia Monterrey.

En este contexto, el impacto asociado con las filtraciones debe entenderse principalmente desde la perspectiva de la disponibilidad del recurso hídrico. Una disminución del volumen almacenado puede incrementar la presión sobre una fuente destinada al abastecimiento de una población metropolitana y reducir el margen disponible para enfrentar periodos de escasez.

No obstante, la presente investigación no evalúa directamente los efectos sociales, económicos o ambientales que una reducción del suministro podría producir en el Área Metropolitana de Monterrey; por ello, dichas implicaciones se plantean únicamente de manera general y a partir de la importancia que representa conservar el recurso almacenado para garantizar su aprovechamiento. Por otra parte, las filtraciones también presentan implicaciones relacionadas con la propia infraestructura de la presa.

Implicaciones de las filtraciones para la estabilidad de la cortina y el dique

La memoria descriptiva señala que durante la construcción se realizaron trabajos para reducir la permeabilidad de la cimentación, mediante una pantalla profunda de impermeabilización y líneas de tapete de consolidación, y que el tratamiento inicialmente previsto para un tramo del dique posteriormente se prolongó a toda su longitud de desplante. El mismo documento registra, dentro del comportamiento del conjunto de la obra, la existencia de filtraciones incipientes de agua al pie de la cortina, lo que muestra que este fenómeno había sido reconocido desde las primeras etapas de operación de la presa.

La permanencia de circulación de agua a través de la cimentación o de los materiales que conforman una presa constituye un aspecto que requiere seguimiento, particularmente cuando existen manifestaciones de agua aguas abajo. En el caso de El Cuchillo, los resultados obtenidos mediante el análisis de las zonas de saturación y el comportamiento piezométrico aportan elementos que justifican mantener la vigilancia de las filtraciones y de su evolución temporal, tanto en la cortina como en el dique.

Sin embargo, los resultados de esta investigación no permiten establecer que las filtraciones estén afectando actualmente la estabilidad de la presa, debido a que no se realizó un análisis geotécnico o estructural orientado a evaluar factores de seguridad, deformaciones, presiones intersticiales o mecanismos internos de erosión. Por esta razón, las implicaciones sobre la infraestructura deben entenderse como una condición que requiere seguimiento y caracterización, y no como evidencia de una condición de inestabilidad.

En términos generales, la magnitud de las pérdidas identificadas adquiere relevancia debido a que la presa El Cuchillo constituye una fuente destinada principalmente al abastecimiento de agua potable. El gasto equivalente de $4.65 \text{ m}^3/\text{s}$, correspondiente al 46.5 % del gasto de diseño de la obra de toma El Cuchillo–Monterrey, muestra que las pérdidas potenciales pueden representar una proporción importante respecto a la capacidad prevista para este aprovechamiento. Aunque no es posible atribuir la totalidad del volumen residual exclusivamente a las filtraciones, los resultados muestran la importancia de continuar con su cuantificación y seguimiento, tanto por sus

implicaciones sobre la disponibilidad del recurso almacenado como como por la necesidad de evaluar su posible incidencia en el comportamiento hidráulico y la estabilidad de la cortina y el dique.

5.7 Integración y discusión general de resultados

La integración de los resultados obtenidos permite establecer una interpretación conjunta del fenómeno de filtración en la presa El Cuchillo. Las zonas de saturación identificadas aguas abajo de la cortina y del dique presentan una distribución espacial coherente con la configuración piezométrica y las direcciones preferenciales del flujo subterráneo, lo que evidencia la relación entre las manifestaciones observadas en superficie y el funcionamiento hidrogeológico del entorno de la presa. La persistencia de este comportamiento durante los periodos analizados indica que las filtraciones forman parte de un sistema de circulación definido, condicionado por la carga hidráulica del embalse y por las características geológicas e hidrogeológicas del medio.

Las variaciones observadas en las superficies afectadas muestran, a su vez, una relación con las condiciones de almacenamiento. En términos generales, un mayor volumen almacenado implica una mayor carga hidráulica y favorece una mayor expresión de las filtraciones aguas abajo; sin embargo, esta respuesta no presenta un comportamiento lineal ni una proporcionalidad constante. Esto indica que el almacenamiento constituye un factor determinante, pero no exclusivo, ya que la circulación del agua también depende de la litología, el fracturamiento, la permeabilidad y de las propias condiciones hidráulicas del sistema subterráneo. Por ello, la respuesta de las filtraciones debe entenderse como el resultado de la interacción dinámica entre el embalse y el medio geológico a través del cual ocurre el flujo.

La evidencia espacial e hidrogeológica se complementa con los resultados cuantitativos obtenidos a partir del comportamiento hídrico del embalse. El volumen residual anual determinado para 2021 fue de 146.598 hm³, equivalente a un gasto promedio de 4.65 m³/s, mientras que el análisis diario y el aforo del río San Juan proporcionaron magnitudes comparables que, junto con los antecedentes disponibles, confirman la importancia hidráulica del fenómeno. Aunque estas estimaciones corresponden a procedimientos y condiciones diferentes y no permiten atribuir la totalidad de los

volúmenes o gastos exclusivamente a las filtraciones, su análisis conjunto muestra una correspondencia en el orden de magnitud y complementa la evidencia obtenida mediante la cartografía y la piezometría.

Desde la perspectiva del aprovechamiento del recurso, el gasto equivalente de 4.65 m³/s representa el 46.5 % del gasto de diseño de 10.00 m³/s de la obra de toma El Cuchillo–Monterrey. Esta relación no representa una reducción directa equivalente en el suministro de agua potable, sino una referencia que permite dimensionar la importancia potencial de las pérdidas respecto a la disponibilidad del agua almacenada. En consecuencia, la persistencia de las filtraciones adquiere mayor relevancia durante periodos de sequía o estiaje, cuando disminuye la disponibilidad del recurso almacenado, así como ante condiciones de alta demanda, al mismo tiempo que su distribución y comportamiento justifican mantener el seguimiento de la respuesta hidráulica de la cortina, el dique y su cimentación, sin que los resultados obtenidos permitan establecer por sí mismos una condición de inestabilidad.

En conjunto, los resultados son consistentes con la hipótesis planteada, al mostrar correspondencia entre el flujo subterráneo y las manifestaciones superficiales de saturación, identificar la influencia de las condiciones de almacenamiento sobre su comportamiento y determinar pérdidas cuya magnitud potencial resulta relevante frente al aprovechamiento del embalse. Si bien ninguno de los métodos empleados permite aislar y cuantificar por sí solo la totalidad de las filtraciones, la convergencia de las evidencias espaciales, piezométricas, hidrológicas e hidráulicas permite caracterizarlas como un componente relevante del funcionamiento hídrico de la presa El Cuchillo, tanto por su relación con la disponibilidad del recurso almacenado como por la necesidad de continuar su seguimiento.

CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

1. La integración de los análisis realizados permitió caracterizar las filtraciones de la presa El Cuchillo como un fenómeno persistente que se manifiesta aguas abajo de la cortina y del dique y que se encuentra relacionado con la circulación del agua almacenada a través del medio geológico. La evidencia obtenida mediante el análisis espacial, la piezometría y el comportamiento hídrico del embalse permitió estudiar el fenómeno desde diferentes enfoques complementarios y establecer que las manifestaciones superficiales observadas forman parte del funcionamiento hidrogeológico asociado a la presa.
2. El análisis multitemporal permitió identificar y delimitar zonas recurrentes de saturación superficial aguas abajo de la cortina y del dique, cuya extensión varía entre los periodos analizados. Estas variaciones presentan una relación con las condiciones de almacenamiento del embalse, ya que, en términos generales, un mayor volumen almacenado genera una mayor carga hidráulica y favorece una mayor expresión de las filtraciones. Sin embargo, esta relación no presenta un comportamiento lineal ni una proporcionalidad constante, lo que indica que el almacenamiento constituye un factor determinante, pero no exclusivo, y que la respuesta del sistema también se encuentra condicionada por las características geológicas e hidrogeológicas del medio.
3. Las cartas piezométricas elaboradas para los diferentes periodos mostraron un patrón de flujo subterráneo semejante y persistente, caracterizado por el movimiento del agua desde sectores de mayor carga hidráulica hacia zonas de menor carga localizadas aguas abajo de la presa, con una tendencia de descarga más marcada hacia el sector de la cortina. La permanencia de esta configuración indica que las direcciones de flujo responden a un funcionamiento hidrogeológico definido, condicionado por el gradiente hidráulico y por las características litológicas, estructurales y de permeabilidad de las unidades geológicas presentes en el área.

4. La superposición de las zonas de saturación superficial con la configuración piezométrica correspondiente al periodo con información temporal coincidente mostró una correspondencia espacial entre las direcciones preferenciales del flujo subterráneo y las áreas donde se manifiestan las filtraciones aguas abajo. Esta coincidencia permite relacionar las manifestaciones identificadas en superficie con el régimen de circulación subterránea y constituye una de las principales evidencias de que parte del agua almacenada en el embalse circula a través del medio geológico y se manifiesta posteriormente en sectores localizados aguas abajo de la cortina y del dique.
5. El balance hídrico realizado permitió identificar una diferencia entre la variación del almacenamiento registrada en el embalse y la estimada a partir de las entradas y salidas consideradas. Para el periodo anual analizado se obtuvo un volumen residual de 146.598 hm^3 , equivalente a un gasto promedio de $4.65 \text{ m}^3/\text{s}$. Este resultado proporciona un parámetro cuantitativo para dimensionar las pérdidas identificadas a partir del comportamiento hídrico del embalse y, al analizarse juntamente con la evidencia espacial y piezométrica obtenida, permite establecer que las filtraciones pueden representar una componente importante de dicha diferencia.
6. La comparación entre los diferentes procedimientos empleados y los antecedentes disponibles permitió establecer referencias complementarias sobre la magnitud de las pérdidas asociadas al sistema. Para el periodo de comparación directa, el balance hídrico diario produjo un gasto equivalente de $10.18 \text{ m}^3/\text{s}$, mientras que el aforo realizado mediante el método sección-velocidad en el río San Juan determinó un gasto de $13.03 \text{ m}^3/\text{s}$, con una diferencia de $2.85 \text{ m}^3/\text{s}$. La correspondencia en el orden de magnitud de estos resultados, junto con las estimaciones reportadas en investigaciones anteriores, aporta elementos adicionales para dimensionar la importancia hidráulica de las pérdidas identificadas. No obstante, debido a que los valores fueron obtenidos mediante métodos, periodos y condiciones diferentes, y a que el caudal medido en el río San Juan integra aportaciones que no corresponden exclusivamente a

las filtraciones, su comparación debe interpretarse como una referencia de magnitud y no como una equivalencia directa entre las distintas estimaciones.

7. La comparación del gasto equivalente asociado al volumen residual anual, de $4.65 \text{ m}^3/\text{s}$, con el gasto de diseño de $10.00 \text{ m}^3/\text{s}$ de la obra de toma El Cuchillo–Monterrey mostró que el primero representa el 46.5 % de dicha capacidad. Esta proporción no significa una reducción directa equivalente en el suministro de agua potable, sino una referencia para dimensionar la importancia potencial de las pérdidas respecto al aprovechamiento del recurso almacenado. En este sentido, la persistencia de las filtraciones adquiere mayor relevancia durante periodos de sequía o estiaje, cuando disminuye la disponibilidad de agua almacenada, así como ante condiciones de alta demanda. Asimismo, la circulación persistente de agua en sectores próximos a la cortina y al dique justifica mantener el seguimiento de su comportamiento hidráulico, sin que los resultados de esta investigación permitan establecer por sí mismos una condición de inestabilidad de estas estructuras.
8. En conjunto, los resultados obtenidos son consistentes con la hipótesis planteada, al mostrar que las filtraciones presentes en la presa El Cuchillo se encuentran relacionadas con el flujo del agua almacenada a través del medio geológico, que este flujo se manifiesta mediante zonas de saturación localizadas aguas abajo de la cortina y del dique y que las pérdidas asociadas pueden alcanzar una magnitud relevante respecto al aprovechamiento del recurso destinado al abastecimiento de agua potable. La convergencia de las evidencias espaciales, piezométricas, hidrológicas e hidráulicas permitió cumplir con el objetivo general de la investigación y proporciona una base técnica para continuar el monitoreo del fenómeno, mejorar la cuantificación de las pérdidas y orientar futuras acciones para la gestión del agua almacenada en la presa El Cuchillo.

6.2 Recomendaciones

1. Se recomienda establecer un programa permanente de monitoreo piezométrico en el entorno de la presa El Cuchillo, manteniendo una red de puntos de observación que permita registrar periódicamente las variaciones del nivel

piezométrico y actualizar las cartas de isopiezas y direcciones de flujo. La continuidad de estos registros permitiría evaluar la evolución del régimen de flujo subterráneo y determinar posibles cambios asociados con las variaciones del nivel de almacenamiento del embalse.

2. Se recomienda realizar un seguimiento sistemático de las zonas de saturación y filtración identificadas aguas abajo de la cortina y del dique, mediante levantamientos periódicos de campo complementados con imágenes aéreas o satelitales. Estos levantamientos deberán realizarse, en la medida de lo posible, bajo diferentes condiciones de almacenamiento, con el propósito de establecer con mayor precisión la relación entre la carga hidráulica del embalse y la extensión de las áreas afectadas, así como reconocer posibles cambios en su distribución espacial a través del tiempo.
3. Se recomienda implementar mediciones directas y periódicas del gasto asociado a las filtraciones en los principales sectores de descarga identificados aguas abajo de la presa. La instalación de dispositivos de aforo o el establecimiento de secciones permanentes de medición permitirían generar series temporales de caudal y disminuir la dependencia de estimaciones indirectas, facilitando la comparación de los gastos registrados con las variaciones del almacenamiento y los niveles piezométricos.
4. Se recomienda dar continuidad a la aplicación del balance hídrico de la presa El Cuchillo en periodos posteriores, utilizando las mismas componentes consideradas en la presente investigación y actualizando la información conforme se disponga de nuevos registros oficiales. La elaboración de balances para diferentes condiciones de almacenamiento permitiría comparar la evolución de los volúmenes residuales y analizar su comportamiento juntamente con las variaciones de las zonas de filtración y de los niveles piezométricos.
5. Se recomienda mantener el seguimiento del comportamiento hidráulico de la cortina, el dique y su cimentación, particularmente en los sectores próximos a las zonas donde se identificaron filtraciones persistentes. Este seguimiento puede complementarse mediante la revisión periódica de los piezómetros existentes, inspecciones visuales de la cortina y el dique, registro de posibles

cambios en las zonas húmedas o puntos de descarga y, cuando se considere necesario, mediciones de asentamientos o desplazamientos mediante nivelación topográfica. Estos procedimientos permitirían identificar oportunamente cambios en el comportamiento de las estructuras, sin que esta recomendación implique que los resultados de la presente investigación indiquen una condición actual de inestabilidad.

6. Se recomienda complementar la caracterización hidrogeológica de las principales zonas de circulación mediante estudios orientados a definir con mayor detalle las características del medio por el que se desplaza el agua. Entre los procedimientos que pueden considerarse se encuentran levantamientos geológicos de detalle para identificar fracturas y discontinuidades, pruebas de permeabilidad en sectores representativos y ensayos sencillos con trazadores para evaluar posibles conexiones entre el embalse y las zonas de descarga aguas abajo. La integración de estos resultados con la información piezométrica permitiría mejorar el conocimiento de las trayectorias preferenciales del flujo subterráneo.
7. Se recomienda evaluar la factibilidad técnica y económica de alternativas para la captación, conducción y posible aprovechamiento del agua asociada a las filtraciones que se manifiestan aguas abajo de la presa. La magnitud de las pérdidas estimadas en esta investigación y su persistencia espacial justifican considerar la posibilidad de recuperar parte de este recurso para algún uso compatible con sus características y condiciones de disponibilidad, particularmente durante periodos de sequía, estiaje o baja disponibilidad del agua almacenada.

BIBLIOGRAFÍA

- Alva-García, F. J. (2001). Estabilidad de taludes en presas de tierra de sección homogénea, considerando los efectos de filtración y sísmicos. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Andaverde-Arredondo, J. A. (1999). Determinación de los mecanismos de filtración mediante métodos geólogo-geofísicos en la presa El Cuchillo-Solidaridad, China, Nuevo León, México. Universidad Autónoma de Nuevo León.
- Aparicio Mijares, F. J. (1992). Fundamentos de hidrología de superficie. Editorial Limusa, S.A. de C.V.
- Baena-Berrendero, C. M. (2011). Análisis de la filtración en presas con cimientos yesíferos. Universidad Politécnica de Madrid.
- Campos Aranda, D. F. (1997). Estimación de la evaporación mensual durante la simulación de la operación del sistema de presas El Cuchillo-Marte R. Gómez. Ingeniería Hidráulica en México, 12(2), 49–56.
- Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1994). Hidrología aplicada. McGraw-Hill Interamericana.
- Chow, V. T. (1994). Hidráulica de canales abiertos. McGraw-Hill.
- Chuvienco, E. (2010). Teledetección ambiental: La observación de la Tierra desde el espacio. Barcelona: Ariel.
- Comisión Nacional del Agua [CONAGUA]. (2011). Acuerdo por el que se da a conocer el resultado de los estudios técnicos de la Región Hidrológica número 24 Bravo-Conchos. Diario Oficial de la Federación.
- Comisión Nacional del Agua [CONAGUA]. (2015). Acuerdo por el que se da a conocer el resultado de los estudios técnicos de aguas nacionales subterráneas del acuífero China-General Bravo, clave 1913, en el Estado de Nuevo León, Región Hidrológico-Administrativa Río Bravo. Diario Oficial de la Federación.

- Comisión Nacional del Agua [CONAGUA]. (2015). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero China-General Bravo (1913), Estado de Nuevo León. Subdirección General Técnica, Gerencia de Aguas Subterráneas.
- Comisión Nacional del Agua [CONAGUA]. (2020). Acuerdo por el que se actualiza la disponibilidad media anual de agua subterránea de los 653 acuíferos de los Estados Unidos Mexicanos, mismos que forman parte de las regiones hidrológico-administrativas que se indican. Diario Oficial de la Federación.
- Comisión Federal de Electricidad [CFE]. (2021). Realización de pruebas Lefranc (Guía CFE 10000-73). Comisión Federal de Electricidad.
- Custodio, E., & Llamas, M. R. (1983). Hidrología subterránea Tomo I (Segunda Edición). Ediciones Omega, S.A.
- Custodio, E., & Llamas, M. R. (1983). Hidrología subterránea Tomo II (Segunda Edición). Ediciones Omega, S.A.
- Diario Oficial de la Federación (DOF). (2018). Estudio técnico de disponibilidad de agua superficial en la cuenca Río San Juan 1. SEGOB.
- El Economista. (2023). En 2030 habrá 7.1 millones de habitantes en Nuevo León que demandarán 40% más de agua. <https://www.eleconomista.com.mx/estados/En-2030-habra-7.1-millones-de-habitantes-en-Nuevo-Leon-que-demandaran-40-mas-de-agua-20230328-0078.html>
- Fell, R., MacGregor, P., Stapledon, D., Bell, G., & Foster, M. (2015). Geotechnical engineering of dams (2nd ed.). CRC Press.
- Gobierno del Estado de Nuevo León. (2023, 12 de octubre). A dos años de gobierno el Acueducto “Cuchillo II”: garantiza 5,000 lps más de agua a Nuevo León. [Gobierno del Estado de Nuevo León — Acueducto Cuchillo II](#)
- Google. (2023). Google Earth Pro [Software]. <https://earth.google.com>

- Herbozo-Alvarado, J. E. (2018). Análisis de filtraciones en cuerpo y cimentación de presas de materiales sueltos-Caso presa Río Grande, Chone-Manabí. Universidad de Guayaquil.
- Hernández-Díaz, M. C. (2019). Aplicación de métodos geoeléctricos para la detección de zonas de filtración en la presa Gonzalo N. Santos, San Luis Potosí. Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C.
- Hernández Ocaña, M. I. (2019). Icnofósiles del Paleógeno en el noreste de México. Universidad Autónoma de Nuevo León.
- Huerta Loera, S. F., & Domínguez Mora, R. (2017). Estimación del riesgo aguas abajo de una presa en función de las políticas de operación a largo plazo: Caso de estudio presa El Cuchillo. *Ingeniare*, 25(1), 116–133. <https://doi.org/10.4067/S0718-33052017000100116>.
- Instituto Mexicano de Tecnología del Agua [IMTA]. (1992). Manual de aforos. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático [INECC]. (2007). Disponibilidad de agua, crecimiento urbano y agricultura de riego en la cuenca del río San Juan.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI]. (1986). Síntesis geográfica del estado de Nuevo León. INEGI.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI]. (2010). Compendio de información geográfica municipal 2010: China, Nuevo León. INEGI.
- Instituto Tecnológico Autónomo de México (ITAM). (2023). Estudios sobre manejo de cuencas y conflictos por el agua en el norte de México.
- Lee, J.-W., Kim, J., & Kang, G.-C. (2018). Seepage behavior of earth dams considering rainfall effects. *Advances in Civil Engineering*, 2018, Article 8727126. <https://doi.org/10.1155/2018/8727126>

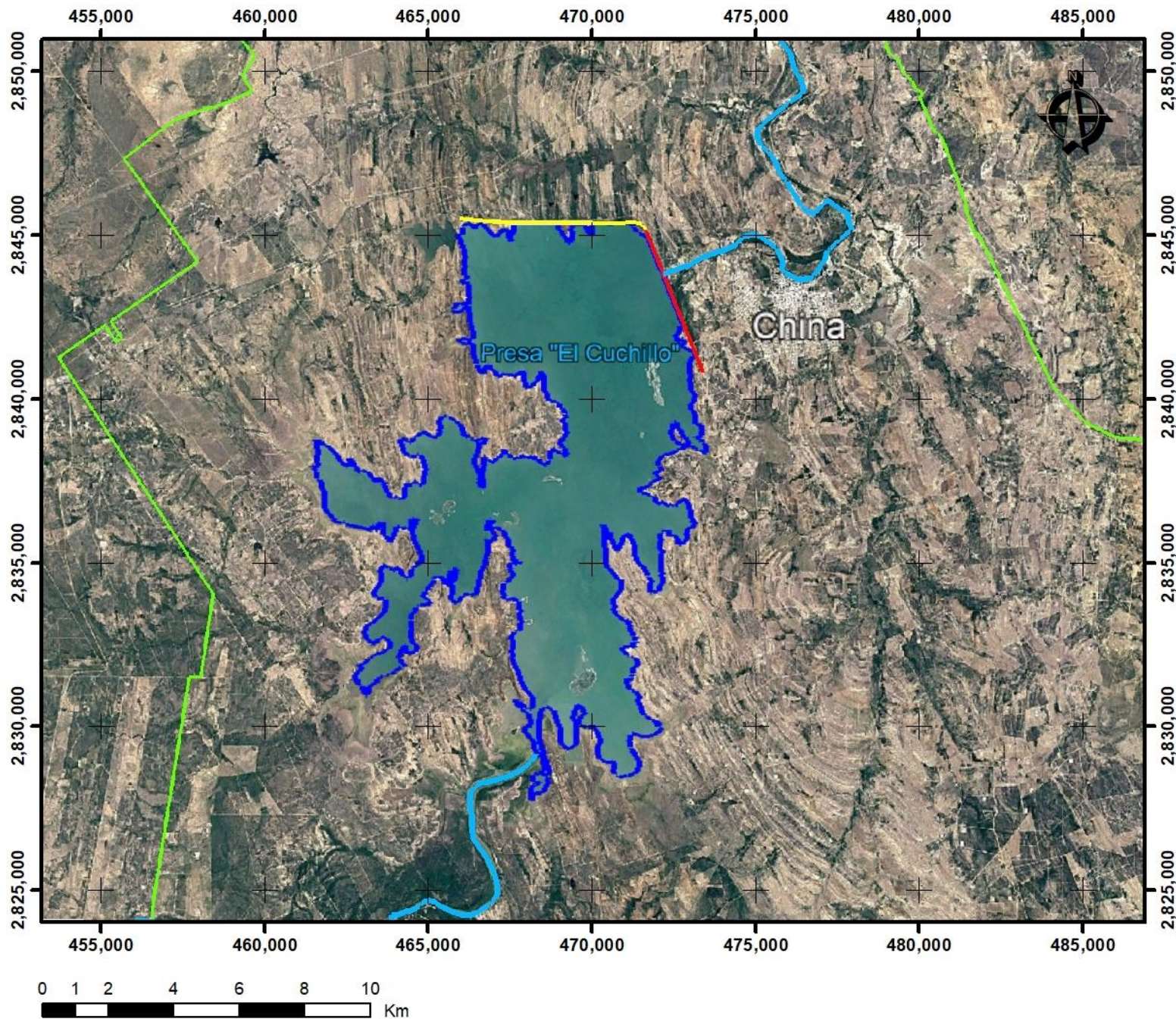
- Li, H., Tian, H., & Ma, K. (2019). Seepage characteristics and its control mechanism of rock mass in high-steep slopes. *Processes*, 7(2), Article 71. <https://doi.org/10.3390/pr7020071>
- Lillesand, T., Kiefer, R. W., & Chipman, J. (2015). *Remote Sensing and Image Interpretation*. Wiley.
- Linsley, R. K., Kohler, M. A., & Paulhus, J. L. H. (1988). *Hidrología para ingenieros* (2.^a ed.). McGraw-Hill.
- Li, X. (2011). Fuerzas de filtración y efectos de sumersión en taludes granulares de presas y bordos. 2011 Pan-Am CGS Geotechnical Conference.
- Longley, P. A., Goodchild, M. F., Maguire, D. J., & Rhind, D. W. (2015). *Geographic information systems and science* (4th ed.). Wiley.
- Lugo-Narváez, N. P. (2018). Diseño de estructuras de Captación y conducción hidráulicas de las filtraciones de la presa “El Cuchillo” en China, N.L. Universidad Autónoma de Nuevo León.
- Mohamedzein, Y. E. A., Al-Hashmi, S. M., & Al-Rawas, A. A. (2016). An investigation of excessive seepage from the Al-Fulaij recharge dam, Oman. *The Journal of Engineering Research*, 13(2), 124–136. <https://doi.org/10.24200/tjer.vol13iss2pp124-136>
- Murillo, R. (2012). Presas de tierra y sus fallas. XXVI Reunión Nacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica.
- Navarro-De León, I. (1996). Estudio hidrogeológico de la loma Los Pozos durante la fase inicial del llenado de la presa El Cuchillo. Universidad Autónoma de Nuevo León.
- Navarro-De León, I., De León-Gómez, H., Werner-Paulus, J. H., & Pola-Símula, C. (1999). Impacto de las discontinuidades litológicas y estructurales en la presa El Cuchillo Solidaridad, China, Nuevo León, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 16(2), 121–131.

- Nwokebuihe, S. C., Alotaibi, A. M., Elkrry, A., Torgashov, E. V., & Anderson, N. L. (2017). Dam seepage investigation of an earthfill dam in Warren County, Missouri using geophysical methods. *AIMS Geosciences*, 3(1), 1–13. <https://doi.org/10.3934/geosci.2017.1.1>
- Parcero-López, A. R. (2016). Estabilidad de taludes de presas de tierra y enrocado ante sismos y fuerza de filtración. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT]. (2015). Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015, Conservación del recurso agua-Que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales. Diario Oficial de la Federación.
- Sheikh Suleimany, J. M., & Mamand, B. S. (2020). Estimating seepage quantity through homogenous earth-fill dam with horizontal drainage using different methods. *Zanco Journal of Pure and Applied Sciences*, 32(1), 7–18. <https://doi.org/10.21271/ZJPAS.32.1.2>
- Treviño-Puente, D. (2011). Revisión hidrológica de las presas Rodrigo Gómez “La Boca” y El Cuchillo-Solidaridad Nuevo León, para elaborar el manual de operación ante la influencia de fenómenos hidrometereológicos extremos. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Velázquez-Sentmanat, A. (2016). Análisis de las filtraciones y la estabilidad de taludes en presas de tierra. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas.
- Werner, J. (1996). Introducción a la hidrogeología. Universidad Autónoma de Nuevo León.
- Xiang, Y., Fu, S.-Y., Zhu, K., Yuan, H., & Fang, Z.-Y. (2017). Seepage safety monitoring model for an earth rock dam under influence of high-impact typhoons based on particle swarm optimization algorithm. *Water Science and Engineering*, 10(1), 70–77. <https://doi.org/10.1016/j.wse.2017.03.005>

ANEXOS

Anexo I: Mapa del Área de Estudio

Área de Estudio: Presa "El Cuchillo"



Ubicación



Área de Estudio (AE-PEC-01)	
Ubicación:	
Presa El Cuchillo, China, N.L.	
Datos de la imagen:	
Google Earth Pro, Marzo 2009	
Sistema de Coordenadas:	
UTM (Zona 14N)	
Fecha elaboración:	Escala:
Sept. 2021	1:175,000
Elaborado por:	
Ing. Gabriel Morales Villalba	

Anexo II: Cartas de Filtraciones

Carta de Filtraciones (2009)



Simbología

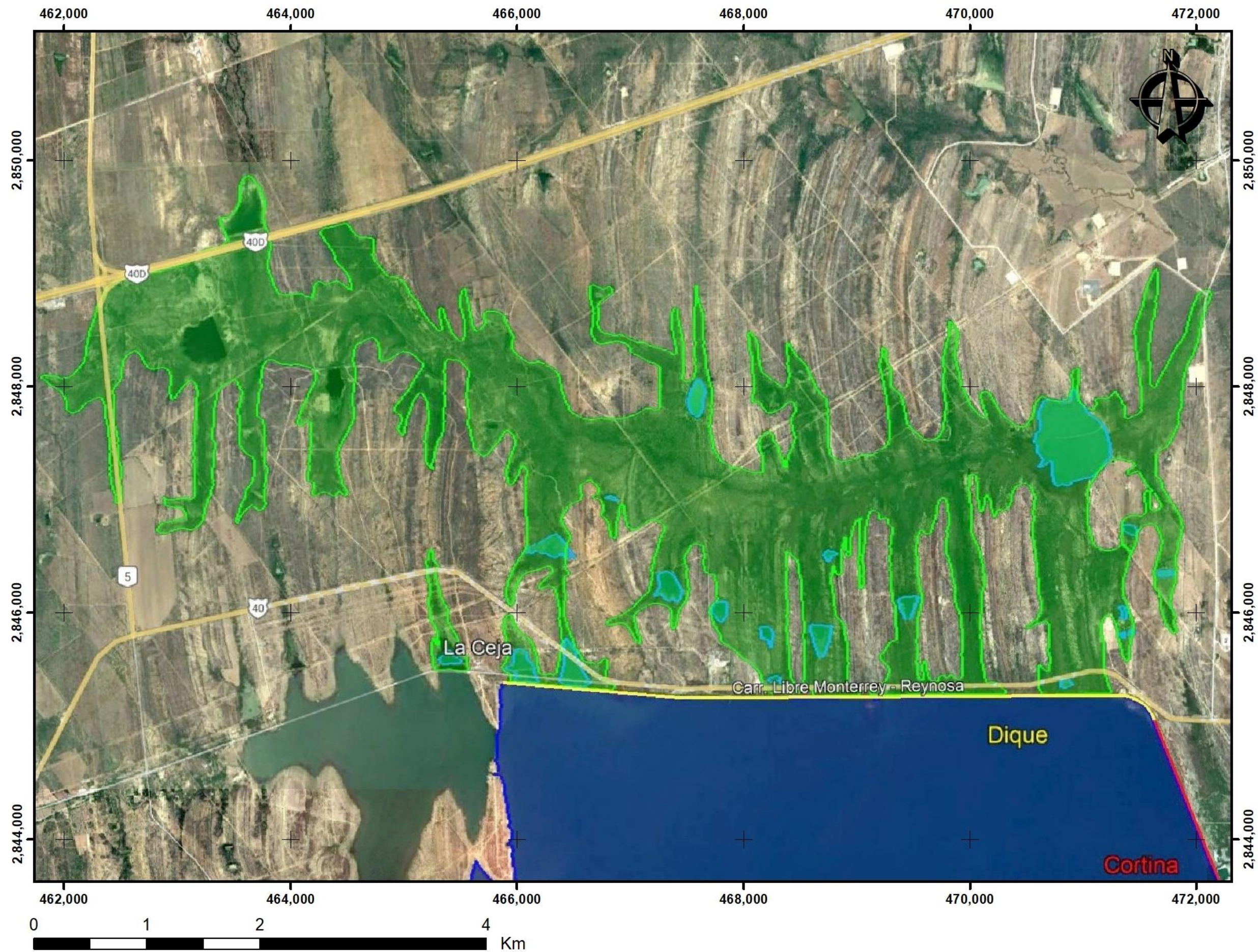
- Humedales
- Zonas con Saturación Hídrica
- Área de Embalse
- Cortina
- Dique
- Carreteras Principales
- Cabecera Municipal



Datos de la presa
Almacenamiento: 1,372.370 hm³
Llenado respecto al NAME: 76.91%
Área aprox. de embalse: 141.769 Km²

Carta de Filtraciones (CF-09-Z01)	
Ubicación: Presa El Cuchillo, China, N.L.	
Zona: Aguas abajo de la cortina	
Área aprox. de zonas saturadas: 13.711 Km²	
Datos de la imagen: Google Earth Pro, Marzo 2009	
Sistema de Coordenadas: UTM (Zona 14N)	
Fecha elaboración: Sept. 2021	Escala: 1:32,000
Elaborado por: Ing. Gabriel Morales Villalba	

Carta de Filtraciones (2009)



Simbología

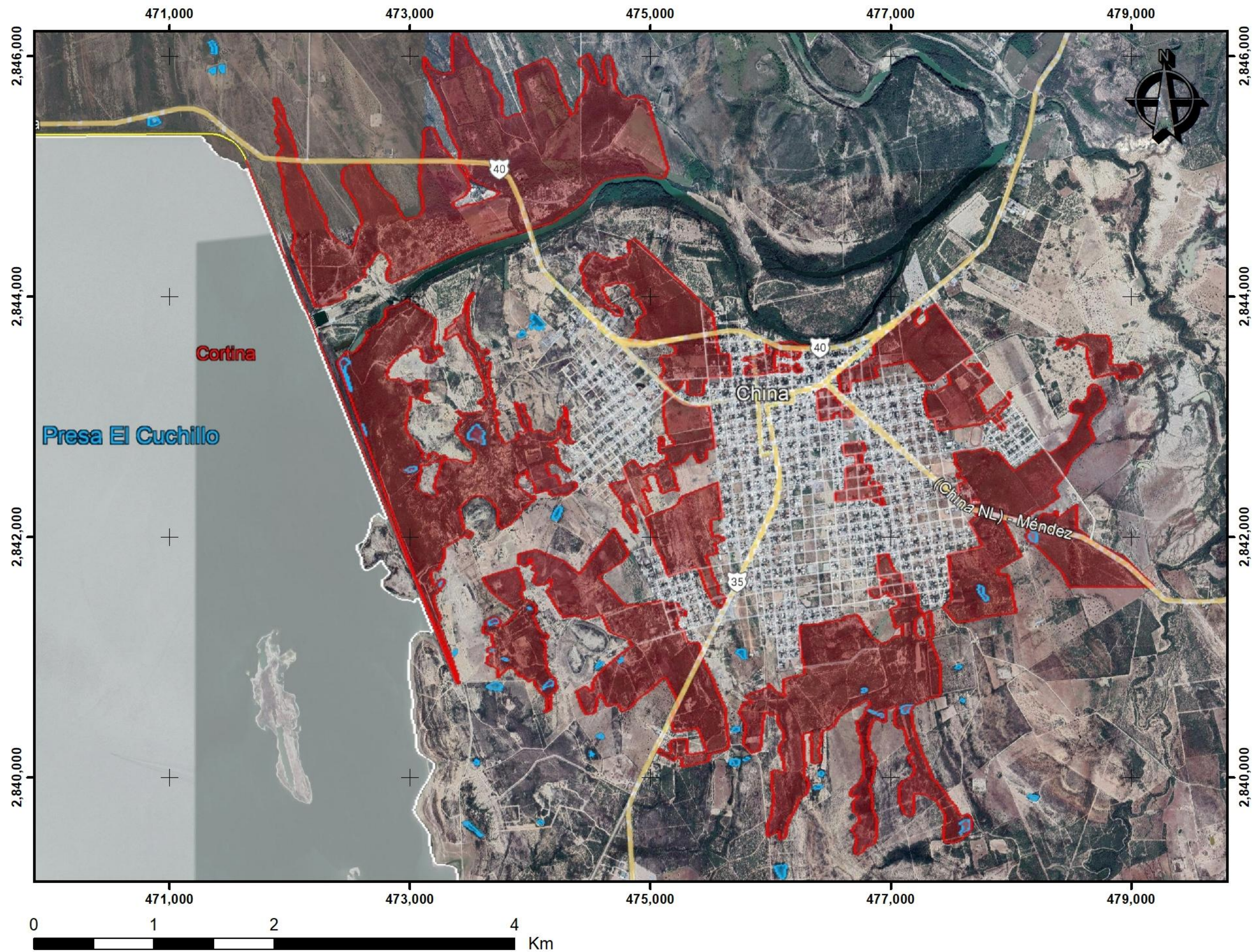
- Humedales
- Zonas con Saturación Hídrica
- Área de Embalse
- Cortina
- Dique
- Carreteras Principales
- Cabecera Municipal



Datos de la presa
Almacenamiento: 1,372.370 hm³
Llenado respecto al NAME: 76.91%
Área aprox. de embalse: 141.769 Km²

Carta de Filtraciones (CF-09-Z02)	
Ubicación: Presa El Cuchillo, China, N.L.	
Zona: Aguas abajo del dique	
Área aprox. de zonas saturadas: 14.392 Km²	
Datos de la imagen: Google Earth Pro, Marzo 2009	
Sistema de Coordenadas: UTM (Zona 14N)	
Fecha elaboración: Sept. 2021	Escala: 1:34,000
Elaborado por: Ing. Gabriel Morales Villalba	

Carta de Filtraciones (2019)



Simbología

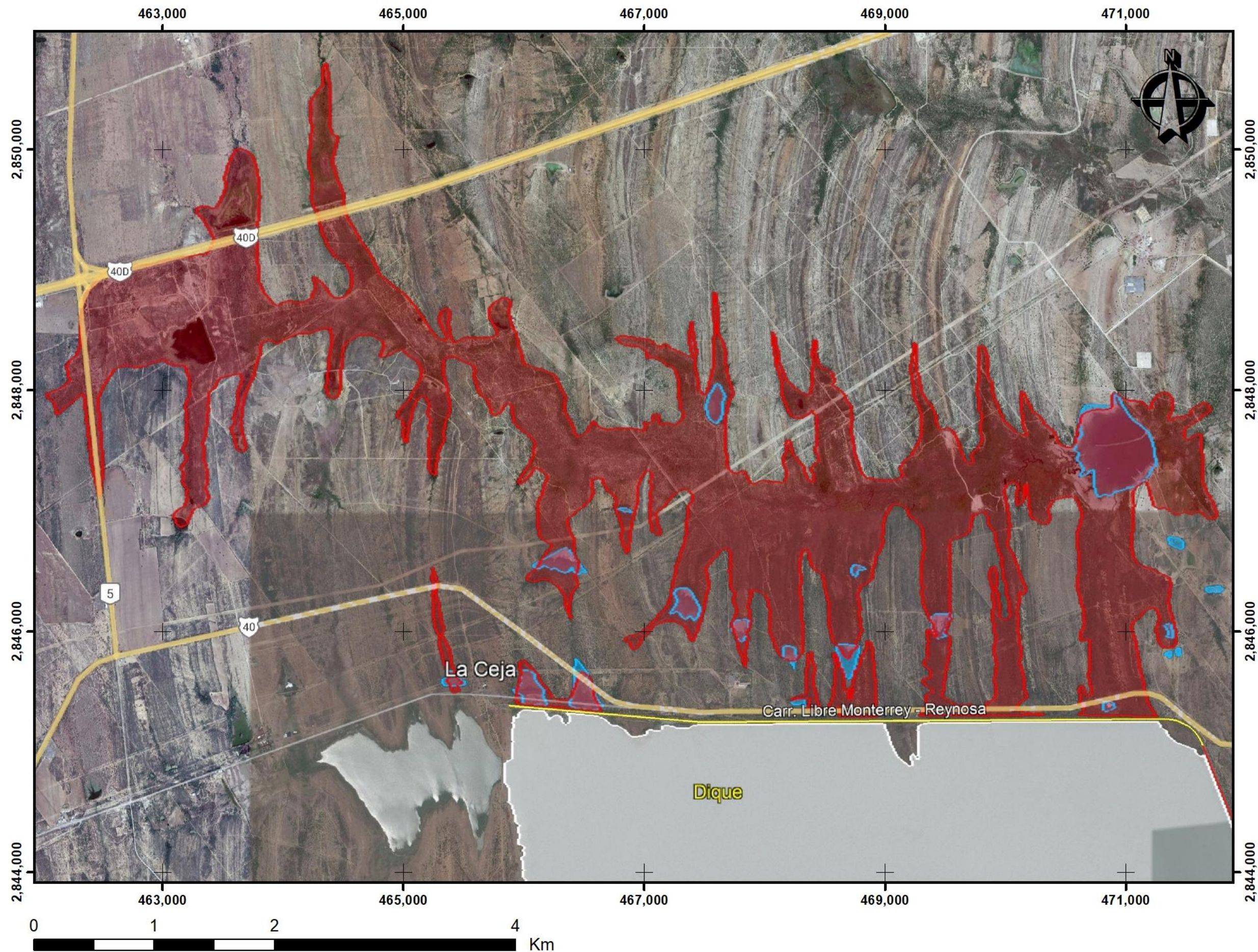
- Humedales
- Zonas con Saturación Hídrica
- Área de Embalse
- Cortina
- Dique
- Carreteras Principales
- Cabecera Municipal



Datos de la presa	
Almacenamiento:	830.094 hm³
Llenado respecto al NAME:	46.52%
Área aprox. de embalse:	116.698 Km²

Carta de Filtraciones (CF-19-Z01)	
Ubicación: Presa El Cuchillo, China, N.L.	
Zona: Aguas abajo de la cortina	
Área aprox. de zonas saturadas: 11.451 Km²	
Datos de la imagen: Google Earth Pro, Julio 2019	
Sistema de Coordenadas: UTM (Zona 14N)	
Fecha elaboración: Sept. 2021	Escala: 1:32,000
Elaborado por: Ing. Gabriel Morales Villalba	

Carta de Filtraciones (2019)



Simbología

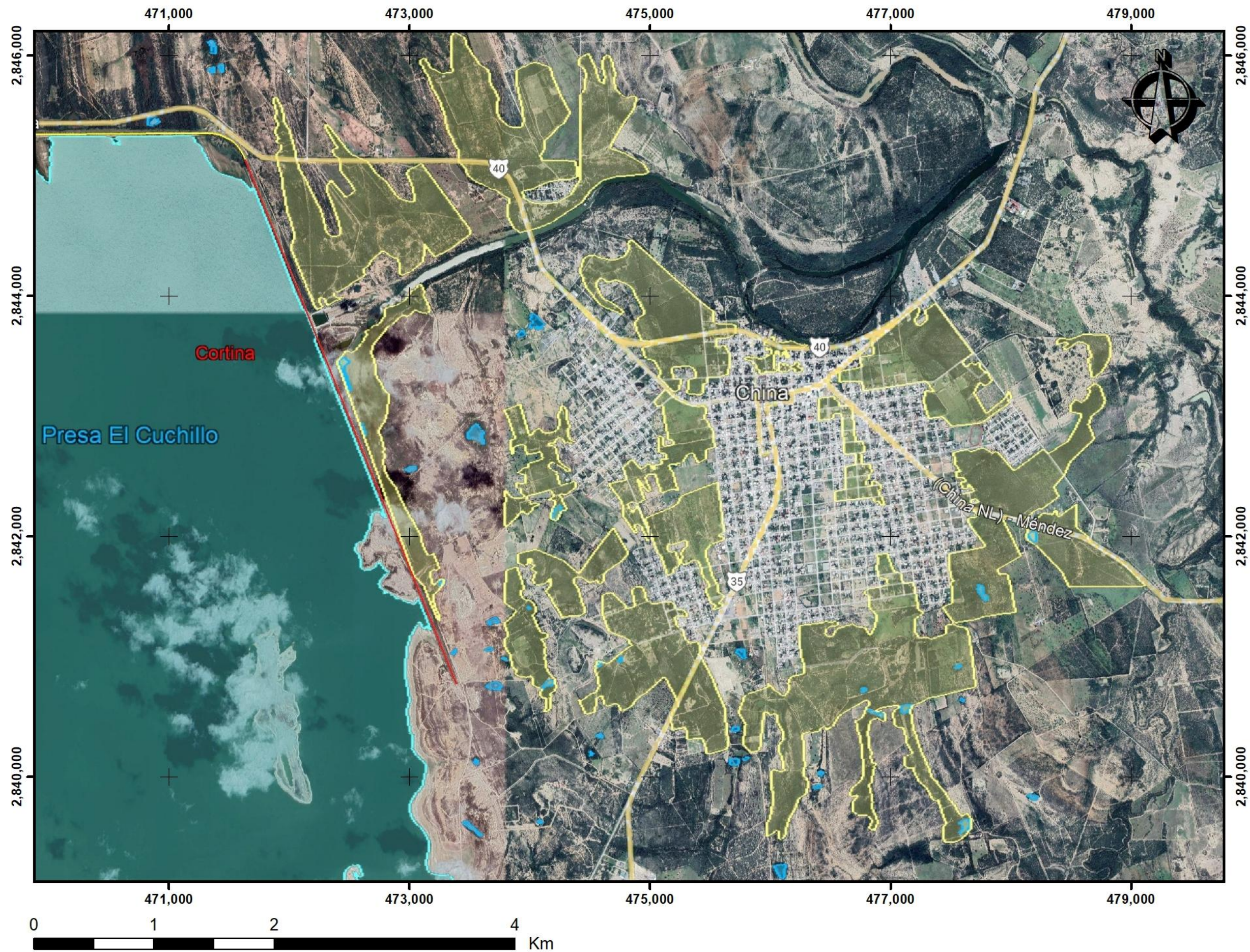
- Humedales
- Zonas con Saturación Hídrica
- Área de Embalse
- Cortina
- Dique
- Carreteras Principales
- Cabecera Municipal



Datos de la presa
Almacenamiento: 830.094 hm³
Llenado respecto al NAME: 46.52%
Área aprox. de embalse: 116.698 Km²

Carta de Filtraciones (CF-19-Z02)	
Ubicación: Presa El Cuchillo, China, N.L.	
Zona: Aguas abajo del dique	
Área aprox. de zonas saturadas: 11.081 Km²	
Datos de la imagen: Google Earth Pro, Julio 2019	
Sistema de Coordenadas: UTM (Zona 14N)	
Fecha elaboración: Sept. 2021	Escala: 1:32,000
Elaborado por: Ing. Gabriel Morales Villalba	

Carta de Filtraciones (2021)



Simbología

- Humedales
- Zonas con Saturación Hídrica
- Área de Embalse
- Cortina
- Dique
- Carreteras Principales
- Cabecera Municipal



Datos de la presa
Almacenamiento: 638.698 hm³
Llenado respecto al NAME: 35.80%
Área aprox. de embalse: 92.257 Km²

Carta de Filtraciones (CF-21-Z01)	
Ubicación: Presa El Cuchillo, China, N.L.	
Zona: Aguas abajo de la cortina	
Área aprox. de zonas saturadas: 9.708 Km²	
Datos de la imagen: Google Earth Pro, Agosto 2021	
Sistema de Coordenadas: UTM (Zona 14N)	
Fecha elaboración: Sept. 2021	Escala: 1:32,000
Elaborado por: Ing. Gabriel Morales Villalba	

Carta de Filtraciones (2021)



Simbología

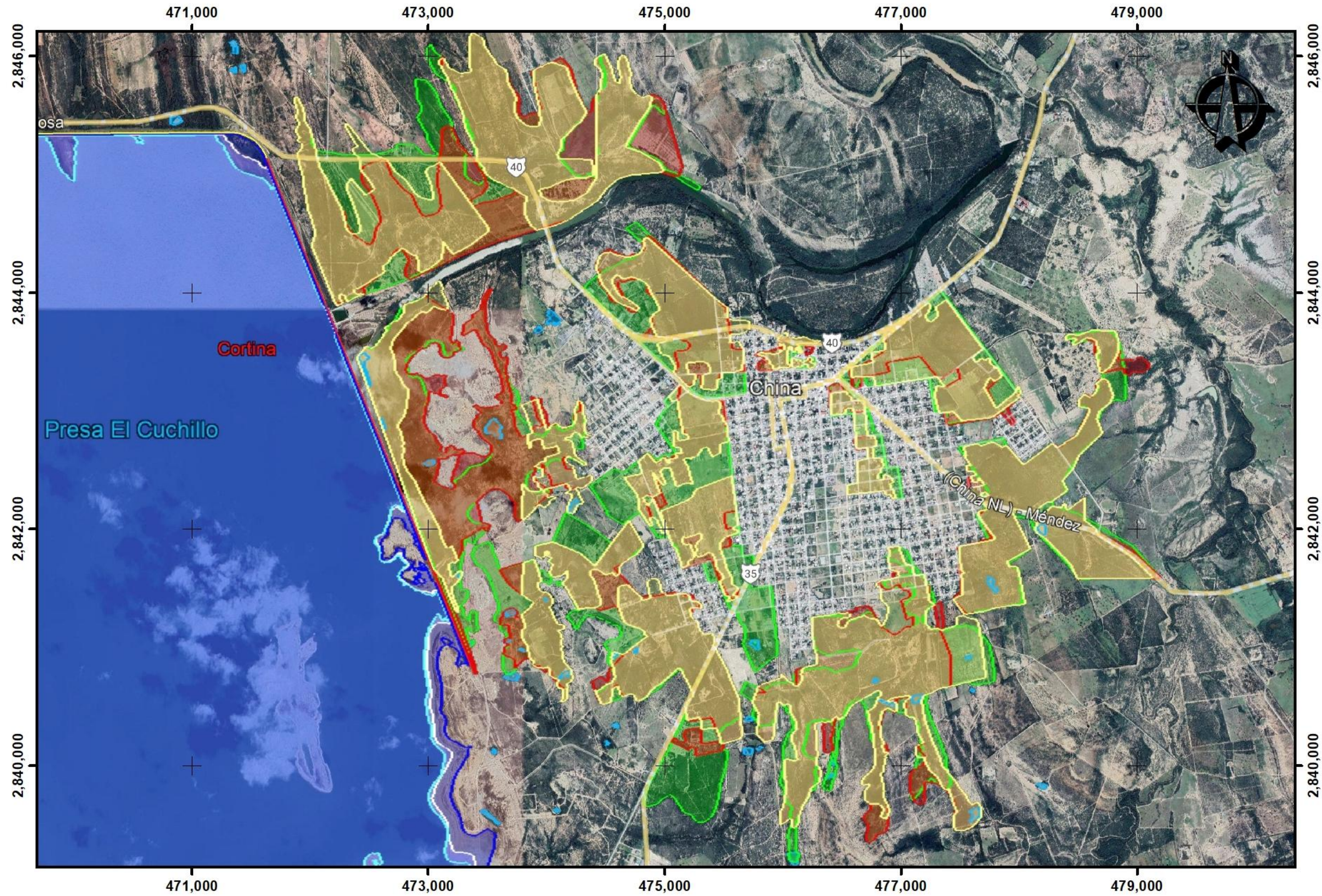
- Humedales
- Zonas con Saturación Hídrica
- Área de Embalse
- Cortina
- Dique
- Carreteras Principales
- Cabecera Municipal



Datos de la presa
Almacenamiento: 638.698 hm³
Llenado respecto al NAME: 35.80%
Área aprox. de embalse: 92.257 Km²

Carta de Filtraciones (CF-21-Z02)	
Ubicación: Presa El Cuchillo, China, N.L.	
Zona: Aguas abajo del dique	
Área aprox. de zonas saturadas: 9.930 Km²	
Datos de la imagen: Google Earth Pro, Agosto 2021	
Sistema de Coordenadas: UTM (Zona 14N)	
Fecha elaboración: Sept. 2021	Escala: 1:32,000
Elaborado por: Ing. Gabriel Morales Villalba	

Carta de Filtraciones Comparativa (2009 / 2019 / 2021)



Simbología

Humedales

2009

2019

2021

Zonas con Saturación Hídrica

2009

2019

2021

Área de Embalse

Cortina

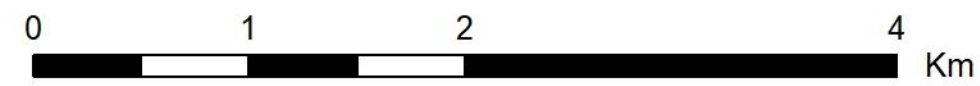
Dique

Carreteras Principales

Cabecera Municipal

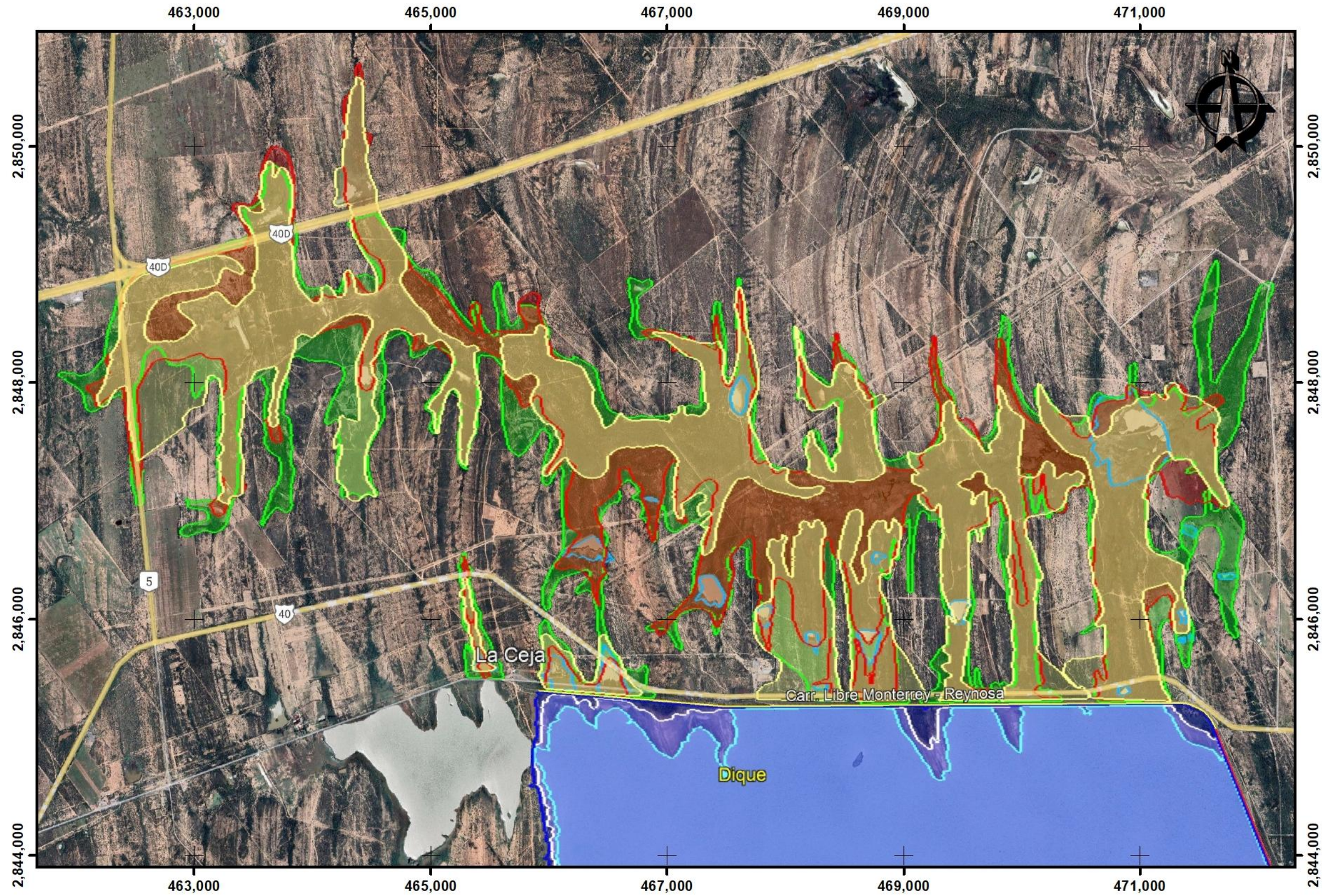


Carta de Filtraciones (CF-COMP-Z01)		
Ubicación: Presa El Cuchillo, China, N.L.		
Zona: Aguas abajo de la cortina		
Área aprox. de zonas saturadas:		
13.711 Km² (2009)	11.451 Km² (2019)	9.708 Km² (2021)
Datos de la imagen: Google Earth Pro, Agosto 2021		
Sistema de Coordenadas: UTM (Zona 14N)		
Fecha elaboración: Sept. 2021	Escala: 1:35,000	
Elaborado por: Ing. Gabriel Morales Villalba		



Datos de la presa								
Almacenamiento			Llenado respecto al NAME			Área aprox. de embalse		
(2009)	(2019)	(2021)	(2009)	(2019)	(2021)	(2009)	(2019)	(2021)
1,372.370 hm³	830.094 hm³	638.698 hm³	76.91%	46.52%	35.80%	141.769 Km²	116.698 Km²	92.257 Km²

Carta de Filtraciones Comparativa (2009 / 2019 / 2021)



Simbología

Humedales

2009

2019

2021

Zonas con Saturación Hídrica

2009

2019

2021

Área de Embalse

Cortina

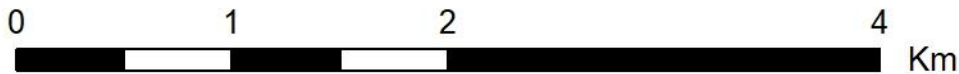
Dique

Carreteras Principales

Cabecera Municipal



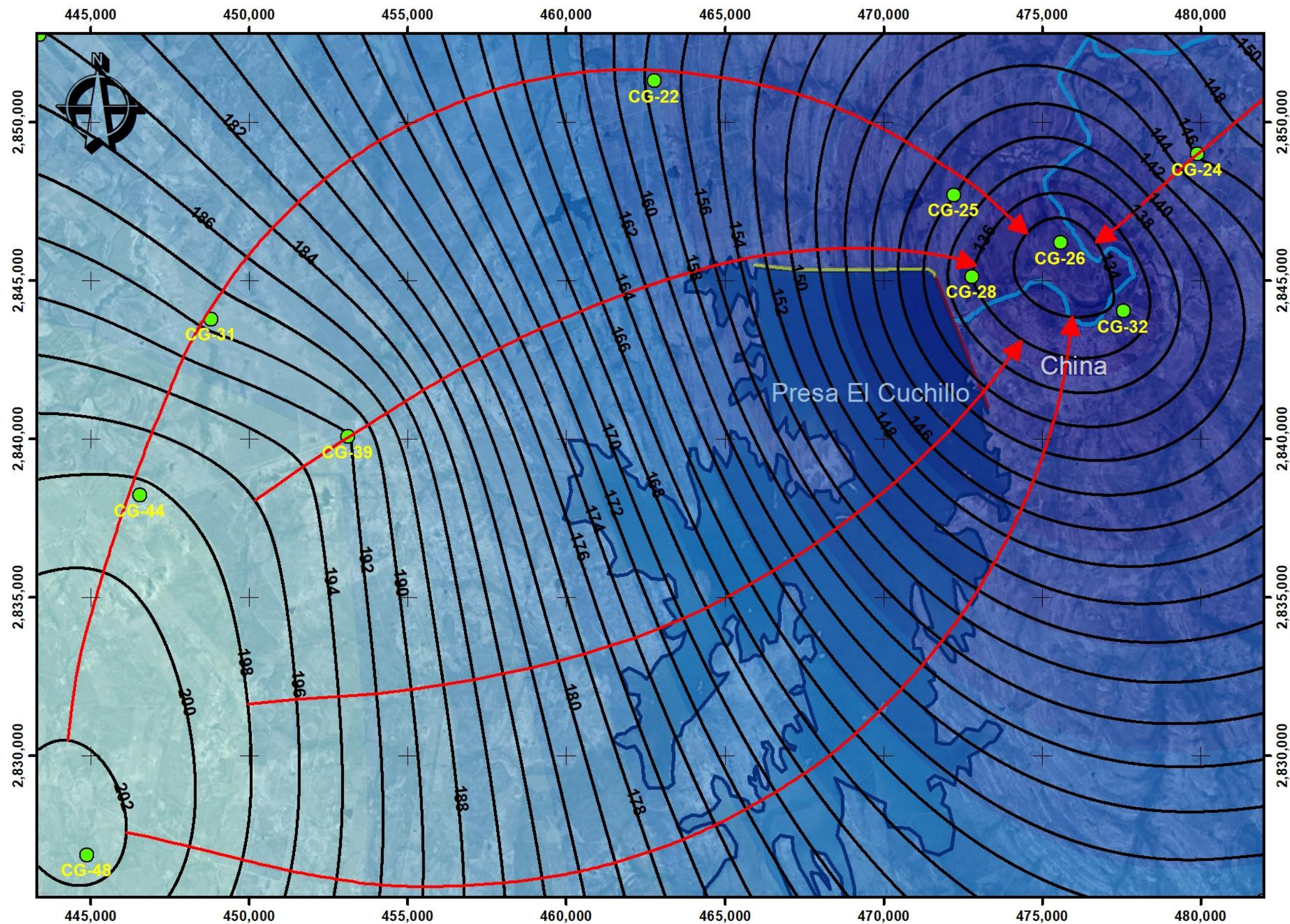
Carta de Filtraciones (CF-COMP-Z02)		
Ubicación: Presa El Cuchillo, China, N.L.		
Zona: Aguas abajo del dique		
Área aprox. de zonas saturadas:		
14.392 Km² (2009)	11.081 Km² (2019)	9.930 Km² (2021)
Datos de la imagen: Google Earth Pro, Agosto 2021		
Sistema de Coordenadas: UTM (Zona 14N)		
Fecha elaboración: Sept. 2021	Escala: 1:35,000	
Elaborado por: Ing. Gabriel Morales Villalba		



Datos de la presa								
Almacenamiento			Llenado respecto al NAME			Área aprox. de embalse		
(2009)	(2019)	(2021)	(2009)	(2019)	(2021)	(2009)	(2019)	(2021)
1,372.370 hm³	830.094 hm³	638.698 hm³	76.91%	46.52%	35.80%	141.769 Km²	116.698 Km²	92.257 Km²

Anexo II: Cartas Piezométricas

Carta Piezométrica (2005)

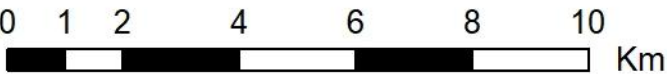


Simbología

- Pozos piezométricos
- Curvas piezométricas
- Líneas de flujo
- Embalse
- Cortina
- Dique
- Río San Juan

Nivel piezométrico (msnm):

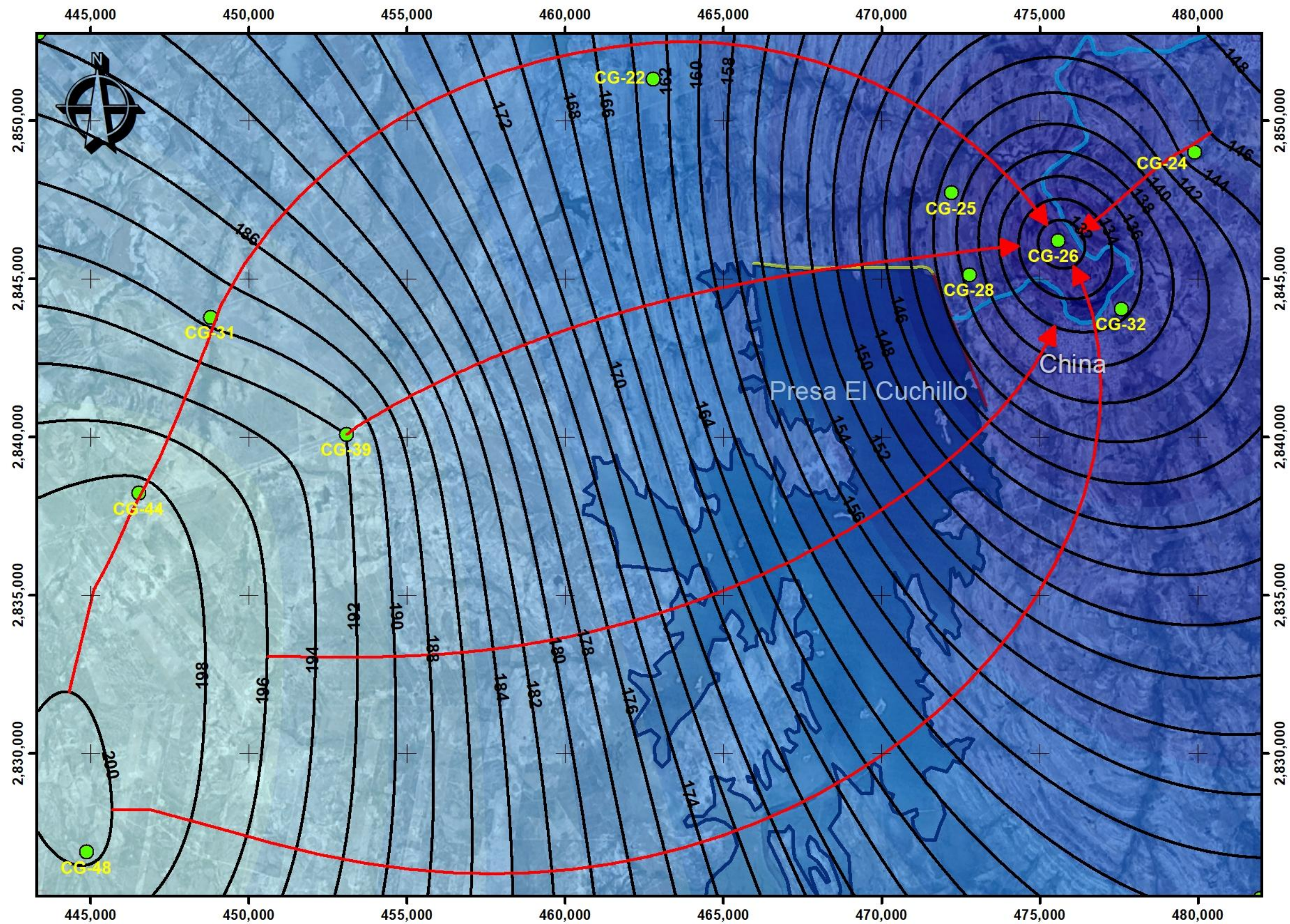
- 132 - 137
- 137 - 142
- 142 - 147
- 147 - 152
- 152 - 157
- 157 - 162
- 162 - 167
- 167 - 172
- 172 - 178
- 178 - 183
- 183 - 188
- 188 - 193
- 193 - 198
- 198 - 203



Datos de la presa	
Almacenamiento:	Llenado respecto al NAME:
1,596.621 hm³	89.48%

Carta Piezométrica (CP-05-GEN)	
Ubicación: Presa El Cuchillo, China, N.L.	
Datos de la imagen: Google Earth Pro, 30-dic-2005	
Sistema de Coordenadas: UTM (Zona 14N)	
DATUM: WGS 1984	Escala: 1:130,000
Elaborado por: Ing. Gabriel Morales Villalba	

Carta Piezométrica (2006)

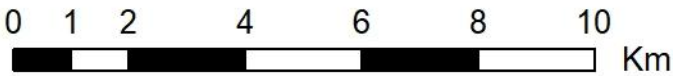


Simbología

- Pozos piezométricos
- Curvas piezométricas
- Líneas de flujo
- Embalse
- Cortina
- Dique
- Río San Juan

Nivel piezométrico (msnm):

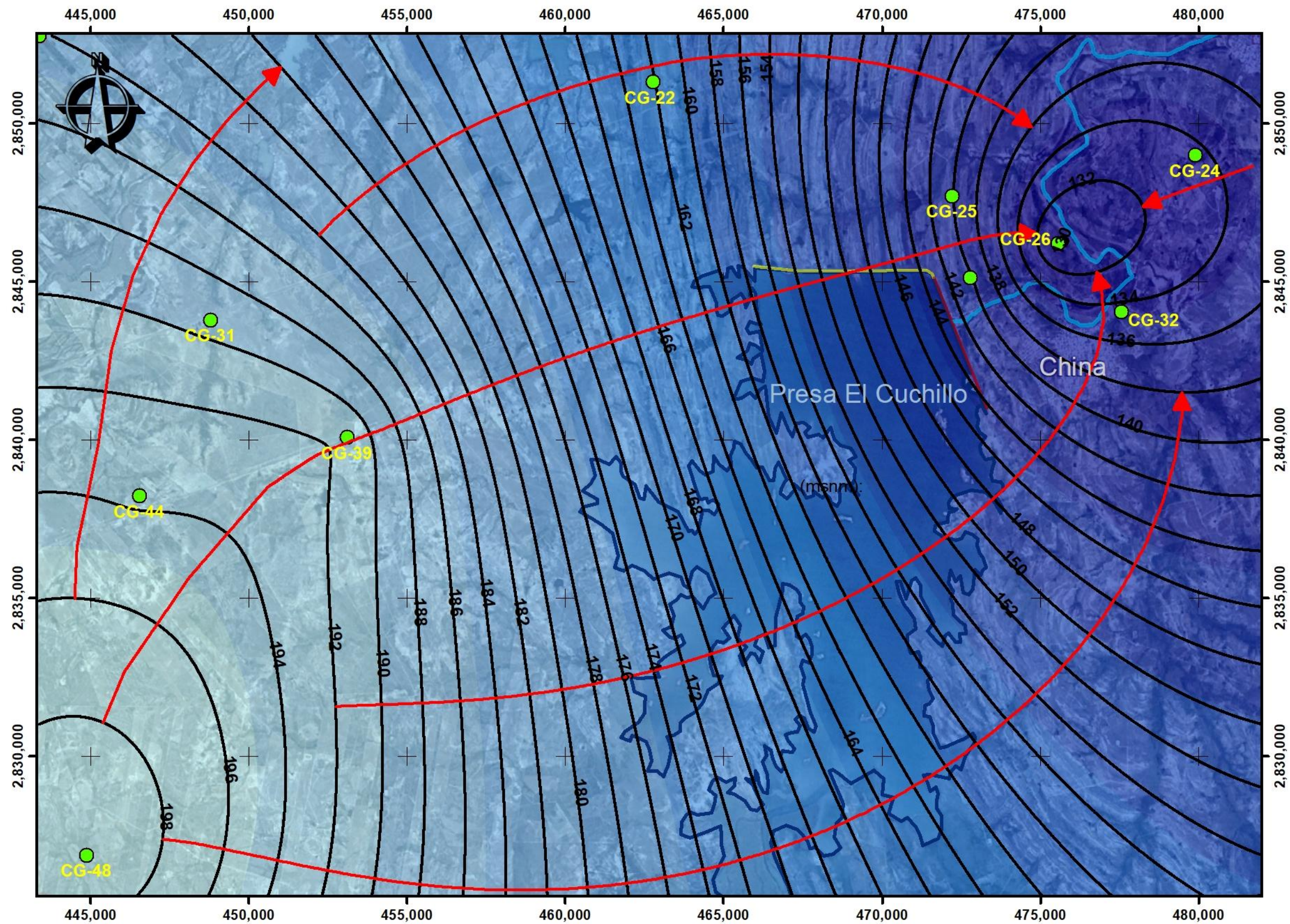
- 130 - 135
- 135 - 140
- 140 - 145
- 145 - 150
- 150 - 155
- 155 - 160
- 160 - 165
- 165 - 170
- 170 - 175
- 175 - 180
- 180 - 185
- 185 - 190
- 190 - 195
- 195 - 200



Datos de la presa	
Almacenamiento:	Llenado respecto al NAME:
1,032.052 hm³	57.84%

Carta Piezométrica (CP-06-GEN)	
Ubicación: Presa El Cuchillo, China, N.L.	
Datos de la imagen: Google Earth Pro, 30-dic-2006	
Sistema de Coordenadas: UTM (Zona 14N)	
DATUM: WGS 1984	Escala: 1:130,000
Elaborado por: Ing. Gabriel Morales Villalba	

Carta Piezométrica (2007)

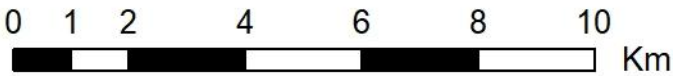


Simbología

- Pozos piezométricos
- Curvas piezométricas
- Líneas de flujo
- Embalse
- Cortina
- Dique
- Río San Juan

Nivel Piezométrico (msnm):

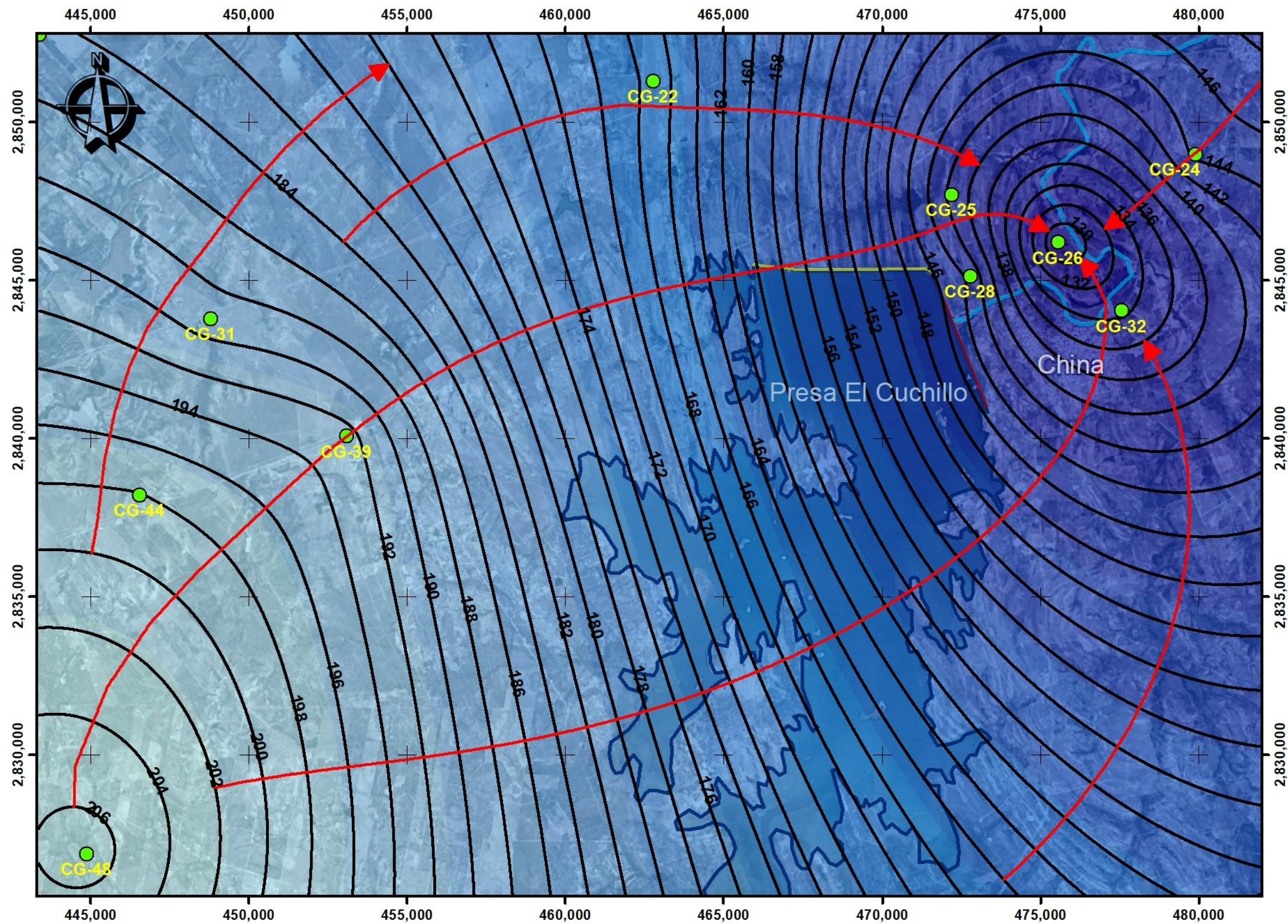
- 130 - 135
- 135 - 140
- 140 - 145
- 145 - 150
- 150 - 155
- 155 - 160
- 160 - 165
- 165 - 170
- 170 - 175
- 175 - 180
- 180 - 185
- 185 - 190
- 190 - 195
- 195 - 200



Datos de la presa	
Almacenamiento:	Llenado respecto al NAME:
1,121.794 hm³	62.87%

Carta Piezométrica (CP-07-GEN)	
Ubicación: Presa El Cuchillo, China, N.L.	
Datos de la imagen: Google Earth Pro, 30-dic-2007	
Sistema de Coordenadas: UTM (Zona 14N)	
DATUM: WGS 1984	Escala: 1:130,000
Elaborado por: Ing. Gabriel Morales Villalba	

Carta Piezométrica (2009)

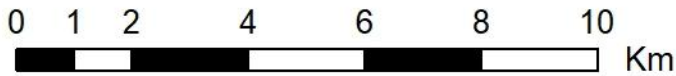


Simbología

- Pozos piezométricos
- Curvas piezométricas
- Líneas de flujo
- Embalse
- Cortina
- Dique
- Río San Juan

Nivel Piezométrico (msnm):

128 - 133
133 - 138
138 - 144
144 - 149
149 - 154
154 - 160
160 - 165
165 - 170
170 - 175
175 - 181
181 - 186
186 - 191
191 - 196
196 - 202
202 - 207

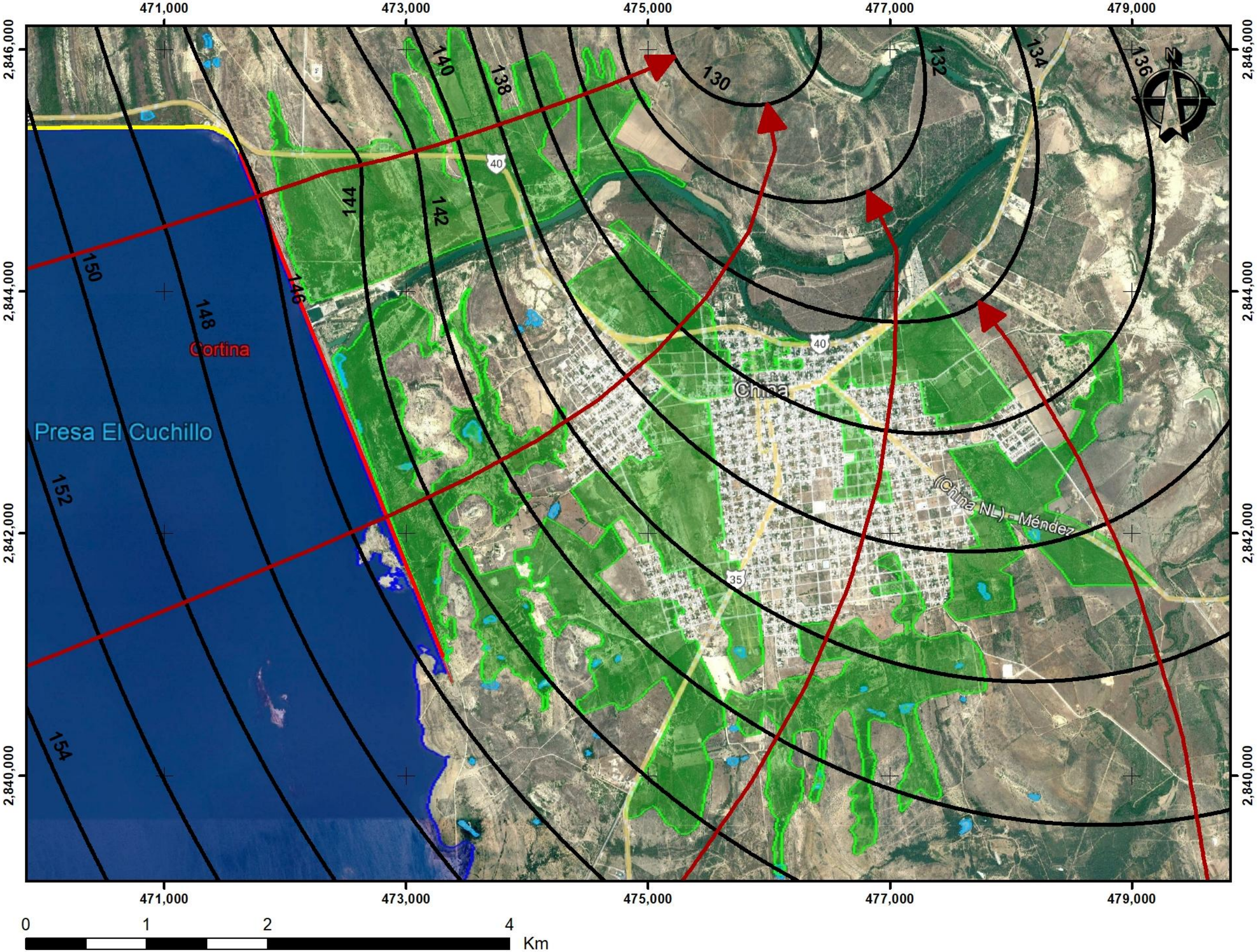


Datos de la presa	
Almacenamiento:	Llenado respecto al NAME:
1,119.100 hm³	62.72%

Carta Piezométrica (CP-09-GEN)	
Ubicación: Presa El Cuchillo, China, N.L.	
Datos de la imagen: Google Earth Pro, 30-dic-2009	
Sistema de Coordenadas: UTM (Zona 14N)	
DATUM: WGS 1984	Escala: 1:130,000
Elaborado por: Ing. Gabriel Morales Villalba	

Anexo IV: Cartas de Filtraciones- Piezometría

Carta de Filtraciones-Piezometría (2009)



Simbología

Líneas de flujo

Curvas piezométricas

Zonas saturadas

Embalse

Río San Juan

Cortina

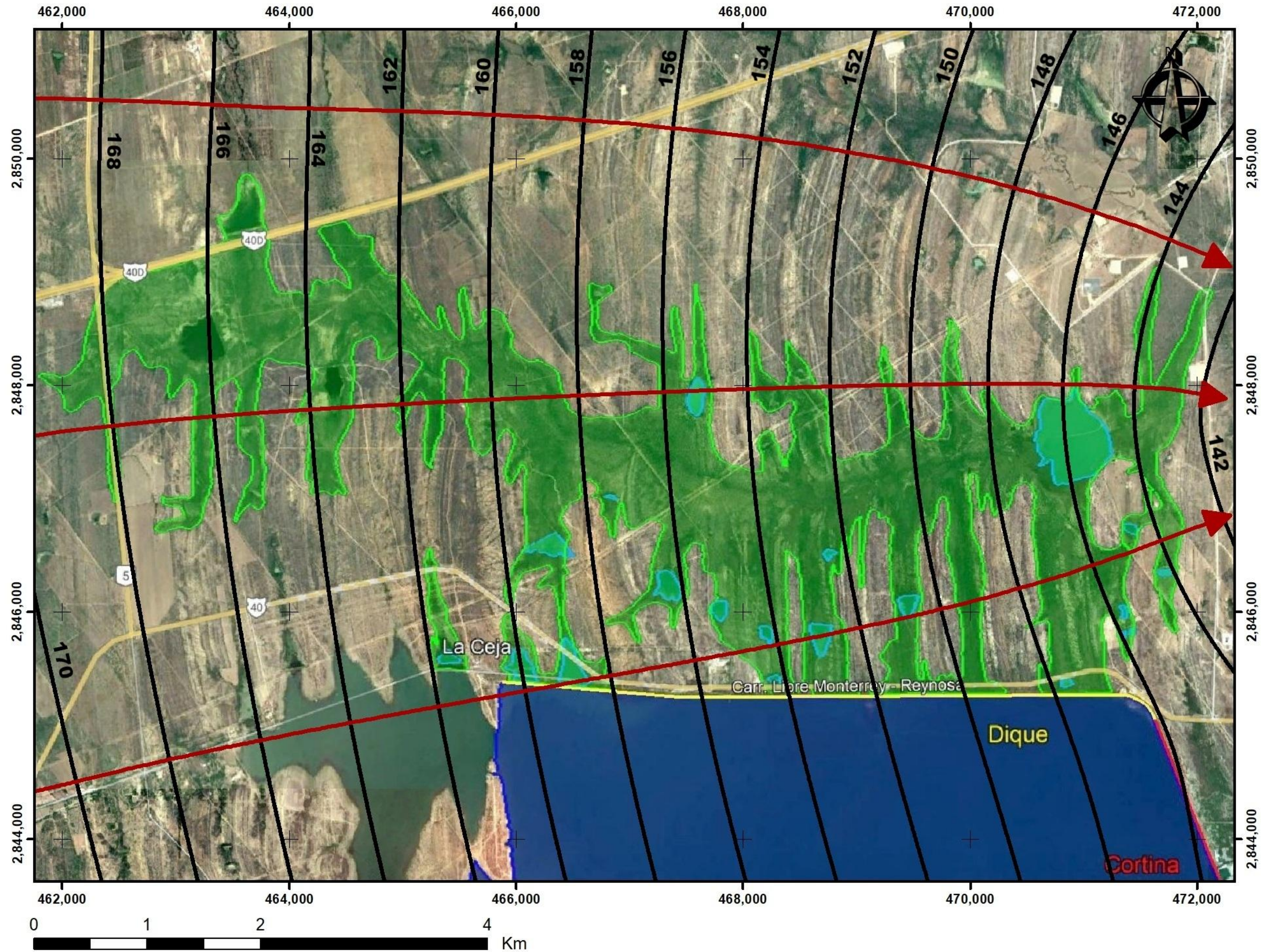
Dique



Datos de la presa
Almacenamiento: 1,372.370 hm³
Llenado respecto al NAME: 76.91%
Área aprox. de embalse: 141.769 Km²

Carta de Filtraciones-Piezometría (CFP-09-Z01)	
Ubicación: Presa El Cuchillo, China, N.L.	
Zona: Aguas abajo de la cortina	
Área aprox. de zonas saturadas: 13.711 Km²	
Datos de la imagen: Google Earth Pro, Marzo 2009	
Sistema de Coordenadas: UTM (Zona 14N)	
Fecha elaboración: Sept. 2021	Escala: 1:32,000
Elaborado por: Ing. Gabriel Morales Villalba	

Carta de Filtraciones-Piezometría (2009)



Simbología

Líneas de flujo

Curvas piezométricas

Zonas saturadas

Embalse

Río San Juan

Cortina

Dique



Datos de la presa	
Almacenamiento:	1,372.370 hm³
Llenado respecto al NAME:	76.91%
Área aprox. de embalse:	141.769 Km²

Carta de Filtraciones-Piezometría (CFP-09-Z02)	
Ubicación:	
Presa El Cuchillo, China, N.L.	
Zona:	
Aguas abajo del dique	
Área aprox. de zonas saturadas:	
14.392 Km²	
Datos de la imagen:	
Google Earth Pro, Marzo 2009	
Sistema de Coordenadas:	
UTM (Zona 14N)	
Fecha elaboración:	Sept. 2021
Escala:	1:34,000
Elaborado por:	
Ing. Gabriel Morales Villalba	