



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

MODELO NUMÉRICO 2D EN DUMUX DEL TRANSPORTE SUBSUPERFICIAL DE  
COMPUESTOS CONSERVATIVOS EN SUELOS MONTAÑOSOS CON DRENAJE ÁCIDO

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL

MARÍA IGNACIA MARTÍNEZ CUEVAS

PROFESOR GUÍA:  
YARKO NIÑO CAMPOS

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
ALDO MUÑOZ SEPÚLVEDA  
SANTIAGO MONSERRAT MICHELINI

SANTIAGO DE CHILE  
2023

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR  
AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL  
POR: MARÍA IGNACIA MARTÍNEZ CUEVAS  
FECHA: 2023  
PROF. GUÍA: YARKO NIÑO CAMPOS

## MODELO NUMÉRICO 2D EN DUMUX DEL TRANSPORTE SUBSUPERFICIAL DE COMPUESTOS CONSERVATIVOS EN SUELOS MONTAÑOSOS CON DRENAJE ÁCIDO

La presencia de depósitos mineros y zonas con alteración hidrotermal puede desencadenar la generación de drenaje ácido de roca (ARD, conocido como *Acid Rock Drainage* en inglés) o de mina (AMD, *Acid Mine Drainage* en inglés), ya sea de forma natural o antropogénica. La generación de ARD resulta de complejas reacciones químicas entre las rocas que contienen minerales sulfuros, el agua y el oxígeno. Estos drenajes pueden deteriorar la calidad de aguas, debido a su bajo pH y, comúnmente, altas concentraciones de metales. El proceso de generación de ARD es incierto y depende de diversos parámetros para determinar la velocidad de ocurrencia. Conocer los tiempos de tránsito puede ayudar a delimitar qué fenómenos, mencionados en la literatura, son compatibles con estos intervalos de tiempos. A raíz de esto, esta memoria estudia un modelo conceptual que orienta ese análisis en un sector particular.

La zona de estudio corresponde a la parte alta de la cuenca Estero Yerba Loca, ubicada en la comuna de Lo Barnechea, Región Metropolitana. En los alrededores del Estero Yerba Loca, en la parte alta, se encuentran glaciares, zonas de alteración hidrotermal y generación de ARD.

En este trabajo, se presenta la modelación conceptual y numérica bidimensional del transporte de un trazador en un lecho poroso no saturado. El modelo se aproximó utilizando una geometría rectangular que representa el subsuelo de la zona de estudio, incorporando condiciones de borde relacionadas con la presencia del glaciar y del estero. La implementación se llevó a cabo mediante el uso del software DuMu<sup>x</sup>, con el objetivo de simular el transporte tanto del flujo como del compuesto en el medio poroso, considerando distintos aportes hídricos y tipos de texturas en el lecho. En este contexto, se define como compuesto a un trazador o componente inerte, como, por ejemplo, un protón.

Estudiando los movimientos de la pluma del trazador, se estimaron los tiempos máximos de transporte en el medio poroso. Asimismo, se analizó la variación de su velocidad a lo largo del medio y su respuesta ante cambios en los parámetros de entrada del modelo, aquellos relacionados con la geometría y la cantidad de aporte hídrico que ingresa al lecho. Los resultados obtenidos indican que los tiempos del trazador dependen de la cantidad de aporte hídrico que ingresa al lecho, del tipo de textura del lecho que se considera y de la dirección en la cual se está transportando el compuesto. Estas variables son fundamentales para comprender los intervalos temporales en los que el trazador alcanza el estero. Además, se observa un aumento en las velocidades del trazador en las cercanías de las condiciones de bordes impermeables, como el fondo del lecho poroso. Por lo tanto, se alcanzan mayores velocidades cuando el trazador recorre en paralelo al fondo.

*Para mi Mane,  
de su nieta ingeniera.*

# Agradecimientos

Quiero agradecer a mi familia. A mi mamá, porque sin ella nada de esto hubiera sido posible. A mi papá, por educarme desde pequeña en creer que puedo con todo. A mi hermano, por sus abrazos y sus constantes "*No te estreses*". A mi tía Negra, por siempre apoyarme y escucharme. A mis primas, por siempre sacarme una sonrisa y carcajada. A mi abuelo, por presionarme a ser una buena profesional. A mi Bella, por su compañía en la escritura de este trabajo y su leal cariño.

También, quiero agradecer a mis amigas y amigos que me acompañaron en este proceso. A Jorgito, por ser mi fiel compañero de hidráulica y buen amigo. A Pía, por siempre estar ahí. A Pame, por su constante preocupación y amistad. A mis amigos de inducción, que siempre me alegran y me hacen disfrutar el momento. A mis amigos y amigas de hidráulica, por su compañía y apoyo a lo largo de la carrera. A mis amigas del colegio, que siempre me alentaban a seguir.

Gracias a la gente que conocí en esta última etapa universitaria. A la gente de la salita, que fueron un pilar importante en esta memoria. A Jacqui, por sus consejos, apoyo y las buenas conversaciones que teníamos.

Muchas gracias a mi pololo, por su compañía en todo este proceso, revisar esta memoria, regalóme, apoyarme, recordarme que yo sí puedo y quererme.

Muchas gracias al profesor Yarko, por ofrecerme este tema y acompañarme en este proceso, por su disposición en resolver mis dudas y consultas, por siempre recibirme en su oficina y preguntarle mil cosas al mismo tiempo, por el aprendizaje que me entregó a lo largo de la memoria, y por las oportunidades brindadas. Muchas gracias Aldo, por todo, por las ayudas en el programa, por las reuniones para ayudarme en lo que me quedaba trabada y por enseñarme muchas cosas nuevas.

Y gracias a todas las personas que contribuyeron en mi aprendizaje y formaron parte de esto.

# Tabla de Contenido

<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
1.1. Motivación . . . . .	1
1.2. Objetivos . . . . .	4
1.2.1. Objetivo general . . . . .	4
1.2.2. Objetivos específicos . . . . .	4
1.3. Organización del informe . . . . .	4
<b>2. ANTECEDENTES DE ESTUDIO</b>	<b>6</b>
<b>3. FLUJOS SUBSUPERFICIALES</b>	<b>9</b>
3.1. Principales términos y conceptos . . . . .	9
3.2. Medio Poroso . . . . .	9
3.2.1. Definiciones y términos . . . . .	9
3.2.2. Volumen Elemental Representativo . . . . .	11
3.2.3. Propiedades del medio poroso . . . . .	12
3.2.3.1. Propiedades de la matriz sólida . . . . .	12
3.2.3.2. Propiedades del fluido . . . . .	13
3.3. Flujo en el medio poroso . . . . .	14
3.3.1. Medio saturado . . . . .	14
3.3.1.1. Ley de Darcy para medios saturados . . . . .	14
3.3.1.2. Conductividad hidráulica . . . . .	15
3.3.1.3. Limitaciones de la Ley de Darcy . . . . .	16
3.3.2. Medio no saturado . . . . .	17
3.3.2.1. Conceptos y propiedades . . . . .	17
3.3.2.2. Ley de Darcy para medios no saturados . . . . .	21
3.4. Ecuaciones Gobernantes . . . . .	21
3.4.1. Flujo en dos fases . . . . .	21
3.4.2. Flujos en una fase . . . . .	22
3.4.3. Condiciones Iniciales . . . . .	22
3.4.4. Condiciones de Borde . . . . .	23
<b>4. ZONA DE ESTUDIO</b>	<b>24</b>
4.1. Ubicación . . . . .	24
4.2. Geomorfología . . . . .	26
4.3. Geología e hidrogeología . . . . .	27
4.4. Glaciares . . . . .	29
4.5. Suelo . . . . .	30
4.6. Alteración hidrotermal . . . . .	31

<b>5. MODELACIÓN NUMÉRICA</b>	<b>32</b>
5.1. Software <b>DuMu<sup>x</sup></b> . . . . .	32
5.2. Consideraciones previas . . . . .	33
5.3. Modelo numérico . . . . .	35
5.4. Escenarios simulados . . . . .	36
5.4.1. Gravedad No Inclinada (GNI) . . . . .	36
5.4.2. Gravedad Inclinada (GI) . . . . .	38
5.5. Determinación del tiempo de llegada del compuesto . . . . .	38
<b>6. RESULTADOS Y ANÁLISIS</b>	<b>40</b>
6.1. Selección de la discretización de la malla . . . . .	40
6.2. Tiempo y velocidades en el Caso Base . . . . .	44
6.3. Variaciones de parámetros . . . . .	49
6.4. Comparación entre Gravedad No Inclinada (GNI) y Gravedad Inclinada (GI)	59
<b>7. CONCLUSIONES</b>	<b>62</b>
<b>Nomenclatura</b>	<b>65</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>67</b>
<b>Anexos</b>	<b>70</b>
A. ZONA DE ESTUDIO . . . . .	70
B. MODELACIÓN NUMÉRICA . . . . .	75
B.1. Variaciones y sus escenarios . . . . .	75
B.2. Ubicaciones de las zonas consideradas según su variación . . . . .	77
B.2.1. Variación de malla . . . . .	77
B.2.2. Variación de área de inyección . . . . .	78
B.2.3. Variación de profundidad . . . . .	79
B.2.4. Variación del largo . . . . .	82
B.3. Distancias entre zonas según su variación . . . . .	83
B.3.1. Variación de malla . . . . .	84
B.3.2. Variación de área de inyección . . . . .	84
B.3.3. Variación de profundidad . . . . .	85
B.3.4. Variación del largo . . . . .	85
C. RESULTADOS Y ANÁLISIS . . . . .	86
C.1. Gravedad No Inclinada (GNI) . . . . .	86
C.1.1. Concentración del trazador en función de su posición en el lecho	86
C.1.2. Razón entre los tiempos de llegada del trazador al estero en	
función de las variaciones . . . . .	94
C.1.3. Tiempos de llegada del trazador al estero en función de las	
variaciones . . . . .	98
C.1.4. Velocidades del trazador en las zonas ubicadas en perpendi-	
cular del fondo . . . . .	106
C.1.5. Velocidades del trazador en las zonas ubicadas en paralelo del	
fondo . . . . .	112
C.2. Gravedad Inclinada (GI) . . . . .	120
C.2.1. Concentración del trazador en función de su posición en el lecho	120

C.2.2.	Razón entre los tiempos de llegada del trazador al estero en función de las variaciones . . . . .	122
C.2.3.	Velocidades del trazador en las zonas ubicadas en perpendicular del fondo . . . . .	123
C.2.4.	Velocidades del trazador en las zonas ubicadas en paralelo del fondo . . . . .	124
C.3.	Ecuaciones utilizadas . . . . .	125

# Índice de Tablas

3.1.	Rango de porosidades para materiales naturales . . . . .	13
4.1.	Parámetros morfológicos de la zona alta del Estero Yerba Loca . . . . .	27
5.1.	Dimensiones del esquema del modelo conceptual . . . . .	34
5.2.	Características de los lechos porosos . . . . .	35
5.3.	Valores evaluados para cada escenario según su estacionalidad . . . . .	37
6.1.	Error relativo entre los tiempos de llegada al estero entre dos mallas en un medio poroso con textura arenosa . . . . .	41
6.2.	Error relativo entre los tiempos de llegada al estero entre dos mallas en un medio poroso con textura franco-limosa . . . . .	41
6.3.	Regresión potencial del tiempo de llegada del trazador al estero en función de la textura del lecho poroso para el Caso Base ( $\text{Tiempo} = a \cdot \text{Textura}^b$ ). . . . .	48
6.4.	Tiempo de llegada del trazador al estero con textura arenosa y franco-limosa para el Caso Base. . . . .	49
B.1.	Gravedad no inclinada: Valores considerados en la variación de malla para los diferentes escenarios con una textura arenosa . . . . .	75
B.2.	Gravedad no inclinada: Valores considerados en la variación de malla para los diferentes escenarios con una textura franco-limosa . . . . .	75
B.3.	Gravedad no inclinada: Valores considerados en la variación de área de inyección para los diferentes escenarios con una textura arenosa o franco-limosa . . . . .	75
B.4.	Gravedad no inclinada: Valores considerados en la variación de profundidad para los diferentes escenarios con una textura arenosa o franco-limosa . . . . .	76
B.5.	Gravedad no inclinada: Valores considerados en la variación del largo para los diferentes escenarios con una textura arenosa . . . . .	76
B.6.	Gravedad no inclinada: Valores considerados en la variación del largo para los diferentes escenarios con una textura franco-limosa . . . . .	76
B.7.	Gravedad inclinada: Valores considerados en la variación de malla y profundidad para el Escenario 2 con una textura arenosa o franco-limosa . . . . .	76
B.8.	Ubicaciones de las zonas consideradas en el análisis de variación de la malla. . . . .	77
B.9.	Ubicaciones de las zonas consideradas en el análisis de variación del área de inyección. . . . .	78
B.10.	Ubicaciones de las zonas consideradas en el análisis de variación de profundidad utilizando una profundidad de 25 m. . . . .	79
B.11.	Ubicaciones de las zonas consideradas en el análisis de variación de profundidad utilizando una profundidad de 40 m. . . . .	79
B.12.	Ubicaciones de las zonas consideradas en el análisis de variación de profundidad utilizando una profundidad de 50 m. . . . .	80
B.13.	Ubicaciones de las zonas consideradas en el análisis de variación de profundidad utilizando una profundidad de 60 m. . . . .	80

B.14.	Ubicaciones de las zonas consideradas en el análisis de variación de profundidad utilizando una profundidad de 100 m. . . . .	81
B.15.	Ubicaciones de las zonas consideradas en el análisis de variación del largo utilizando un largo de 1500 m. . . . .	82
B.16.	Ubicaciones de las zonas consideradas en el análisis de variación del largo utilizando un largo de 2500 m. . . . .	82
B.17.	Ubicaciones de las zonas consideradas en el análisis de variación del largo utilizando un largo de 5000 m. . . . .	83
B.18.	Distancias entre las zonas consideradas en el análisis de variación de la malla. .	84
B.19.	Distancias entre las zonas consideradas en el análisis de variación del área de inyección. . . . .	84
B.20.	Distancias entre las zonas consideradas en el análisis de variación de la profundidad.	85
B.21.	Distancias entre las zonas consideradas en el análisis de variación del largo. . .	85

# Índice de Ilustraciones

1.1.	Mapa de la Cuenca Río San Francisco, ubicada en Santiago, Región Metropolitana.	3
3.1.	Ángulo de contacto entre la fase que moja y que no moja . . . . .	11
3.2.	Escalas en un medio poroso . . . . .	12
3.3.	Experimento de Darcy . . . . .	14
3.4.	Conductividad hidráulica para materiales geológicos saturados . . . . .	16
3.5.	Curva de retención . . . . .	19
3.6.	Permeabilidad relativa . . . . .	20
4.1.	Delimitación de la subsubcuenca Río San Francisco . . . . .	25
4.2.	Curva hipsométrica de la cuenca Estero Yerba Loca . . . . .	26
4.3.	Parámetros geomorfológicos de la zona de estudio . . . . .	27
4.4.	Unidades geológicas en la zona de estudio . . . . .	28
4.5.	Glaciares y perfiles hidrogeológicos en la zona de estudio . . . . .	30
4.6.	Zona de alteración hidrotermal y glaciares en la zona de estudio . . . . .	31
5.1.	Esquema del modelo conceptual . . . . .	33
5.2.	Esquema del modelo conceptual del caso de gravedad no inclinada . . . . .	36
5.3.	Esquema del modelo conceptual del caso de gravedad inclinada . . . . .	38
5.4.	Zonas consideradas a lo largo del lecho poroso para las distintas variaciones. . . . .	39
6.1.	Tiempos de transporte del trazador al estero al variar la cantidad de celdas en la malla. . . . .	40
6.2.	Tiempos de transporte del trazador al estero al variar la cantidad de celdas en la malla en escala logarítmica. Las líneas punteadas son las regresiones potenciales de cada caso y los puntos son los tiempos obtenidos. . . . .	42
6.3.	Valores de los coeficientes $a$ y $b$ de las regresiones potenciales (Tiempo = $a \cdot$ Cantidad de celdas <sup><math>b</math></sup> ). . . . .	42
6.4.	Velocidades del trazador en función del recorrido perpendicular al fondo al variar la cantidad de celdas en la malla según el aporte hídrico y textura del lecho. . . . .	43
6.5.	Velocidades del trazador en función del recorrido paralelo al fondo al variar la cantidad de celdas en la malla según el aporte hídrico y textura del lecho. . . . .	43
6.6.	Concentración del trazador en el lecho poroso con textura arenosa en el Escenario 2. Se visualiza el Caso Base. . . . .	45
6.7.	Concentración del trazador en el lecho poroso con textura arenosa en el Escenario 2. Se visualiza el Caso Base. . . . .	45
6.8.	Caso Base: Tiempo de llegada al estero en función del aporte hídrico . . . . .	47
6.9.	Caso Base: Tiempo de llegada al estero en función del aporte hídrico . . . . .	48
6.10.	Razón entre los tiempos de transporte del trazador al estero al variar la cantidad de celdas en la malla, el área de inyección del aporte hídrico, la profundidad y el largo del lecho poroso ( $t_i$ ) y los tiempos de transporte obtenidos del Caso Base ( $t_{base}$ ). . . . .	50

6.11.	Tiempo de llegada del trazador en función de las distintas variaciones junto a sus regresiones potenciales, su aporte hídrico y tipo de textura en el lecho. . .	51
6.12.	Valores de los coeficientes $a$ y $b$ de la regresión potencial $\text{Tiempo} = a \cdot \text{Variación}^b$ en función de los escenarios. . . . .	54
6.13.	Velocidades del trazador en función del recorrido perpendicular al fondo para los distintos escenarios al variar el área de inyección del aporte hídrico, la profundidad y el largo del lecho con textura arenosa y franco-limosa según el aporte hídrico. En los paneles de la izquierda se encuentran las velocidades obtenidas con un lecho poroso arenoso, mientras en la derecha con un lecho poroso franco-limoso. Además, se observa la velocidad obtenida a partir de la solución analítica de Vanderborght. . . . .	56
6.14.	Velocidades del trazador en función del recorrido paralelo al fondo para los distintos escenarios al variar el área de inyección del aporte hídrico, la profundidad y el largo del lecho con textura arenosa y franco-limosa según el aporte hídrico.	58
6.15.	Comparación de tiempos de transporte del trazador desde la zona glaciar hasta el estero para los casos de Gravedad No Inclinada (GNI) y Gravedad Inclinada (GI) según el tipo de textura. . . . .	60
6.16.	Velocidades del trazador en función del recorrido perpendicular al fondo al variar la profundidad del lecho con un aporte hídrico de $2,27 \text{ L}/(\text{m}^2 \text{ d})$ . . . . .	60
6.17.	Velocidades del trazador en función del recorrido paralelo al fondo al variar la profundidad del lecho con un aporte hídrico de $2,27 \text{ L}/(\text{m}^2 \text{ d})$ . . . . .	61
A.1.	Mapa ubicación de la cuenca Estero Yerba Loca . . . . .	70
A.2.	Mapa hidrogeológico . . . . .	71
A.3.	Elevaciones del Contacto Primario-Secundario . . . . .	72
A.4.	Perfil hidrogeológico C-C' . . . . .	73
A.5.	Mapa de alteración hidrotermal . . . . .	74
B.1.	Ubicaciones de las zonas consideradas en el análisis de variación de la cantidad de celdas en la malla . . . . .	77
B.2.	Ubicaciones de las zonas consideradas en el análisis de variación del área de inyección . . . . .	78
B.3.	Ubicaciones de las zonas consideradas en el análisis de variación de la profundidad del lecho . . . . .	82
B.4.	Ubicaciones de las zonas consideradas en el análisis de variación del largo del lecho	83
C.1.	Concentración del trazador en el lecho poroso con textura arenosa en el Escenario 1. Se visualiza el Caso Base. . . . .	86
C.2.	Concentración del trazador en el lecho poroso con textura franco-limosa en el Escenario 1. Se visualiza el Caso Base. . . . .	87
C.3.	Concentración del trazador en el lecho poroso con textura arenosa en el Escenario 2. Se visualiza el Caso Base. . . . .	88
C.4.	Concentración del trazador en el lecho poroso con textura franco-limosa en el Escenario 2. Se visualiza el Caso Base. . . . .	89
C.5.	Concentración del trazador en el lecho poroso con textura arenosa en el Escenario 3. Se visualiza el Caso Base. . . . .	90
C.6.	Concentración del trazador en el lecho poroso con textura franco-limosa en el Escenario 3. Se visualiza el Caso Base. . . . .	91
C.7.	Concentración del trazador en el lecho poroso con textura arenosa en el Escenario 4. Se visualiza el Caso Base. . . . .	92

C.8.	Concentración del trazador en el lecho poroso con textura franco-limosa en el Escenario 4. Se visualiza el Caso Base. . . . .	93
C.9.	Variación de malla: Razón entre los tiempos de llegada del trazador al estero en un lecho arenoso . . . . .	94
C.10.	Variación de malla: Razón entre los tiempos de llegada del trazador al estero en un lecho franco-limoso . . . . .	94
C.11.	Variación de área de inyección: Razón entre los tiempos de llegada del trazador al estero en un lecho arenoso . . . . .	95
C.12.	Variación de área de inyección: Razón entre los tiempos de llegada del trazador al estero en un lecho arenoso . . . . .	95
C.13.	Variación de profundidad: Razón entre los tiempos de llegada del trazador al estero en un lecho arenoso . . . . .	96
C.14.	Variación de profundidad: Razón entre los tiempos de llegada del trazador al estero en un lecho franco-limoso . . . . .	96
C.15.	Variación del largo: Razón entre los tiempos de llegada del trazador al estero en un lecho arenoso . . . . .	97
C.16.	Variación del largo: Razón entre los tiempos de llegada del trazador al estero en un lecho franco-limoso . . . . .	97
C.17.	Tiempos de llegada del trazador al estero en función de la variación de la cantidad de celdas en una malla en el Escenario 1. . . . .	98
C.18.	Tiempos de llegada del trazador al estero en función de la variación de la cantidad de celdas en una malla en el Escenario 2. . . . .	98
C.19.	Tiempos de llegada del trazador al estero en función de la variación de la cantidad de celdas en una malla en el Escenario 3. . . . .	99
C.20.	Tiempos de llegada del trazador al estero en función de la variación de la cantidad de celdas en una malla en el Escenario 4. . . . .	99
C.21.	Tiempos de llegada del trazador al estero en función de la variación del área de inyección del aporte hídrico en el Escenario 1. . . . .	100
C.22.	Tiempos de llegada del trazador al estero en función de la variación del área de inyección del aporte hídrico en el Escenario 2. . . . .	100
C.23.	Tiempos de llegada del trazador al estero en función de la variación del área de inyección del aporte hídrico en el Escenario 3. . . . .	101
C.24.	Tiempos de llegada del trazador al estero en función de la variación del área de inyección del aporte hídrico en el Escenario 4. . . . .	101
C.25.	Tiempos de llegada del trazador al estero en función de la variación de la profundidad del lecho poroso en el Escenario 1. . . . .	102
C.26.	Tiempos de llegada del trazador al estero en función de la variación de la profundidad del lecho poroso en el Escenario 2. . . . .	102
C.27.	Tiempos de llegada del trazador al estero en función de la variación de la profundidad del lecho poroso en el Escenario 3. . . . .	103
C.28.	Tiempos de llegada del trazador al estero en función de la variación de la profundidad del lecho poroso en el Escenario 4. . . . .	103
C.29.	Tiempos de llegada del trazador al estero en función de la variación del largo del lecho poroso en el Escenario 1. . . . .	104
C.30.	Tiempos de llegada del trazador al estero en función de la variación del largo del lecho poroso en el Escenario 2. . . . .	104

C.31.	Tiempos de llegada del trazador al estero en función de la variación del largo del lecho poroso en el Escenario 3. . . . .	105
C.32.	Tiempos de llegada del trazador al estero en función de la variación del largo del lecho poroso en el Escenario 4. . . . .	105
C.33.	Velocidades del trazador en función de las distintas zonas ubicadas en perpendicular al fondo del lecho y según la cantidad de celdas utilizadas en la malla en el Escenario 1. . . . .	106
C.34.	Velocidades del trazador en función de las distintas zonas ubicadas en perpendicular al fondo del lecho y según la cantidad de celdas utilizadas en la malla en el Escenario 2. . . . .	106
C.35.	Velocidades del trazador en función de las distintas zonas ubicadas en perpendicular al fondo del lecho y según la cantidad de celdas utilizadas en la malla en el Escenario 3. . . . .	107
C.36.	Velocidades del trazador en función de las distintas zonas ubicadas en perpendicular al fondo del lecho y según la cantidad de celdas utilizadas en la malla en el Escenario 4. . . . .	107
C.37.	Velocidades del trazador en función de las distintas zonas ubicadas en perpendicular al fondo del lecho y según el área de inyección del aporte hídrico en el Escenario 1. . . . .	108
C.38.	Velocidades del trazador en función de las distintas zonas ubicadas en perpendicular al fondo del lecho y según el área de inyección del aporte hídrico en el Escenario 2. . . . .	108
C.39.	Velocidades del trazador en función de las distintas zonas ubicadas en perpendicular al fondo del lecho y según el área de inyección del aporte hídrico en el Escenario 3. . . . .	109
C.40.	Velocidades del trazador en función de las distintas zonas ubicadas en perpendicular al fondo del lecho y según el área de inyección del aporte hídrico en el Escenario 4. . . . .	109
C.41.	Velocidades del trazador en función de las distintas zonas ubicadas en perpendicular al fondo del lecho y según la profundidad del lecho poroso en el Escenario 1. . . . .	110
C.42.	Velocidades del trazador en función de las distintas zonas ubicadas en perpendicular al fondo del lecho y según la profundidad del lecho poroso en el Escenario 2. . . . .	110
C.43.	Velocidades del trazador en función de las distintas zonas ubicadas en perpendicular al fondo del lecho y según la profundidad del lecho poroso en el Escenario 3. . . . .	111
C.44.	Velocidades del trazador en función de las distintas zonas ubicadas en perpendicular al fondo del lecho y según la profundidad del lecho poroso en el Escenario 4. . . . .	111
C.45.	Velocidades del trazador en función de las distintas zonas ubicadas en paralelo al fondo del lecho y según la cantidad de celdas utilizadas en la malla en el Escenario 1. . . . .	112
C.46.	Velocidades del trazador en función de las distintas zonas ubicadas en paralelo al fondo del lecho y según la cantidad de celdas utilizadas en la malla en el Escenario 2. . . . .	112

C.47.	Velocidades del trazador en función de las distintas zonas ubicadas en paralelo al fondo del lecho y según la cantidad de celdas utilizadas en la malla en el Escenario 3. . . . .	113
C.48.	Velocidades del trazador en función de las distintas zonas ubicadas en paralelo al fondo del lecho y según la cantidad de celdas utilizadas en la malla en el Escenario 4. . . . .	113
C.49.	Velocidades del trazador en función de las distintas zonas ubicadas en paralelo al fondo del lecho y según el área de inyección del aporte hídrico en el Escenario 1.	114
C.50.	Velocidades del trazador en función de las distintas zonas ubicadas en paralelo al fondo del lecho y según el área de inyección del aporte hídrico en el Escenario 2.	114
C.51.	Velocidades del trazador en función de las distintas zonas ubicadas en paralelo al fondo del lecho y según el área de inyección del aporte hídrico en el Escenario 3.	115
C.52.	Velocidades del trazador en función de las distintas zonas ubicadas en paralelo al fondo del lecho y según el área de inyección del aporte hídrico en el Escenario 4.	115
C.53.	Velocidades del trazador en función de las distintas zonas ubicadas en paralelo al fondo del lecho y según la profundidad del lecho poroso en el Escenario 1. . . . .	116
C.54.	Velocidades del trazador en función de las distintas zonas ubicadas en paralelo al fondo del lecho y según la profundidad del lecho poroso en el Escenario 2. . . . .	116
C.55.	Velocidades del trazador en función de las distintas zonas ubicadas en paralelo al fondo del lecho y según la profundidad del lecho poroso en el Escenario 3. . . . .	117
C.56.	Velocidades del trazador en función de las distintas zonas ubicadas en paralelo al fondo del lecho y según la profundidad del lecho poroso en el Escenario 4. . . . .	117
C.57.	Velocidades del trazador en función de las distintas zonas ubicadas en paralelo al fondo del lecho y según el largo del lecho poroso en el Escenario 1. . . . .	118
C.58.	Velocidades del trazador en función de las distintas zonas ubicadas en paralelo al fondo del lecho y según el largo del lecho poroso en el Escenario 2. . . . .	118
C.59.	Velocidades del trazador en función de las distintas zonas ubicadas en paralelo al fondo del lecho y según el largo del lecho poroso en el Escenario 3. . . . .	119
C.60.	Velocidades del trazador en función de las distintas zonas ubicadas en paralelo al fondo del lecho y según el largo del lecho poroso en el Escenario 4. . . . .	119
C.61.	Concentración del trazador en el lecho poroso con textura arenosa en el Escenario 2. Se visualiza el Caso Base del gravedad inclinada. . . . .	120
C.62.	Concentración del trazador en el lecho poroso con textura franco-limosa en el Escenario 2. Se visualiza el Caso Base del gravedad inclinada. . . . .	121
C.63.	Tiempos de llegada del trazador al estero en función de la variación de la cantidad de celdas en una malla en el Escenario 2. . . . .	122
C.64.	Tiempos de llegada del trazador al estero en función de la variación de la profundidad del lecho poroso en el Escenario 2. . . . .	122
C.65.	Velocidades del trazador en función de las distintas zonas ubicadas en perpendicular al fondo del lecho y según la cantidad de celdas utilizadas en la malla en el Escenario 2. . . . .	123
C.66.	Velocidades del trazador en función de las distintas zonas ubicadas en perpendicular al fondo del lecho y según la profundidad del lecho poroso en el Escenario 2. . . . .	123
C.67.	Velocidades del trazador en función de las distintas zonas ubicadas en paralelo al fondo del lecho y según la cantidad de celdas utilizadas en la malla en el Escenario 2. . . . .	124

C.68. Velocidades del trazador en función de las distintas zonas ubicadas en paralelo al fondo del lecho y según la profundidad del lecho poroso en el Escenario 2. . 124

# Capítulo 1

## INTRODUCCIÓN

### 1.1. Motivación

En la cordillera de los Andes, especialmente en Chile y Argentina, se presentan depósitos mineros y zonas de alteración hidrotermal, donde esto puede provocar una generación de drenaje ácido de mina (AMD, *Acid Mine Drainage* por sus siglas en inglés), si el drenaje ácido es antropogénico, o drenaje ácido de roca (ARD, *Acid Rock Drainage* por sus siglas en inglés), si el drenaje ácido es natural (Toro et al., 2012). Estos drenajes ácidos se producen comúnmente bajo efectos climáticos, en los cuales las rocas con alteración hidrotermal en superficie están en contacto con el agua. Los AMD y ARD producen efectos en la calidad del agua, dado que poseen una alta concentración de metales y sulfatos, donde estos efectos impactan al medio ambiente (Zegers et al., 2021).

La generación de ARD es el resultado de la exposición de rocas que contienen cantidades significativas de minerales de sulfuro al agua y al oxígeno. Al estar expuestas, estas sufren una serie de reacciones químicas que producen este drenaje ácido (Egiebor y Oni, 2007). La velocidad de las reacciones químicas, generación de drenaje, depende de diversos factores: la cantidad de sulfuros presentes en la roca, la cantidad de agua y oxígeno, el clima, la presencia de ciertas bacterias y los depósitos geológicos (Egiebor y Oni, 2007; Zegers et al., 2021). Por lo tanto, el proceso de generación de ARD es incierto.

Para proyectar la generación y el transporte de estos drenajes, la principal herramienta es la modelación numérica (Charte et al., 2015). Además, esta herramienta es útil para entender el transporte de minerales y metales en ríos, permite considerar procesos como la hidrología, hidrodinámica, el transporte de sedimentos y solutos, y la geoquímica (Zegers et al., 2021).

La realización de estos modelos requiere de un proceso inicial de estimación de escalas temporales y el análisis del comportamiento que tienen los drenajes en sistemas naturales, con el fin de simplificar el análisis del modelo. Al conocer los tiempos de tránsito de estos drenajes en el estudio, estos pueden ayudar a acotar qué fenómenos reportados en la literatura pueden ser compatibles con estos tiempos. Además, estos modelos son una herramienta para la prevención y el buen manejo de aguas en la protección del medio ambiente.

DuMu<sup>x</sup> es un software de simulación numérica que se basa en la biblioteca de DUNE<sup>1</sup>, su función es modelar el transporte de un flujo con múltiples fases, componentes, escalas y distintos modelos físicos en medios porosos. Es un simulador gratuito y de código abierto para procesos de flujo y de transporte en medios porosos (Koch et al., 2021). Fue creado por el Departamento de Hidromecánica y Modelamiento de Hidrosistemas de la Universidad de Stuttgart, en enero del 2007 ([dumux.org](http://dumux.org)). Tiene como objetivo proporcionar un marco sostenible y consistente para la implementación de modelos, relaciones constitutivas, discretizaciones y soluciones (Flemisch, 2013). En términos de aplicaciones subsuperficiales, se han presentado investigaciones exitosas utilizando DuMu<sup>x</sup>, como en problemas de remediación ambiental y en medios porosos fracturados (Scheer, Class, y Flemisch, 2021).

A partir de esto nace la idea de generar un modelo conceptual, una simplificación del caso real, el cual represente el transporte subsuperficial de estos compuestos, como metales, minerales sulfuros, entre otros, desde una zona montañosa con presencia de drenaje ácido hacia un estero o río, con el objetivo de conocer el tiempo de transporte del compuesto.

El caso de estudio de este trabajo de título corresponde a una modelación del transporte del compuesto conservativo en el Estero Yerba Loca, ubicado en la comuna de Lo Barnechea, Región Metropolitana. El estero se encuentra en la cuenca Río San Francisco y posee glaciares en la zona alta de la cuenca. En la Figura 1.1 se observa un mapa en el cual se encuentra el Estero Yerba Loca y la ubicación de glaciares en la cuenca. La cuenca alta se caracteriza por poseer superficies con roca hidrotermal alterada causando ARD (Zegers et al., 2021).

---

<sup>1</sup> DUNE: Distributed Unified Numerics Environment. Es una herramienta que ayuda a resolver ecuaciones diferenciales parciales (Flemisch, 2013).

**Mapa de la delimitación de la Cuenca Río San Francisco - Región Metropolitana, Chile**  
**Escala 1:260.000**

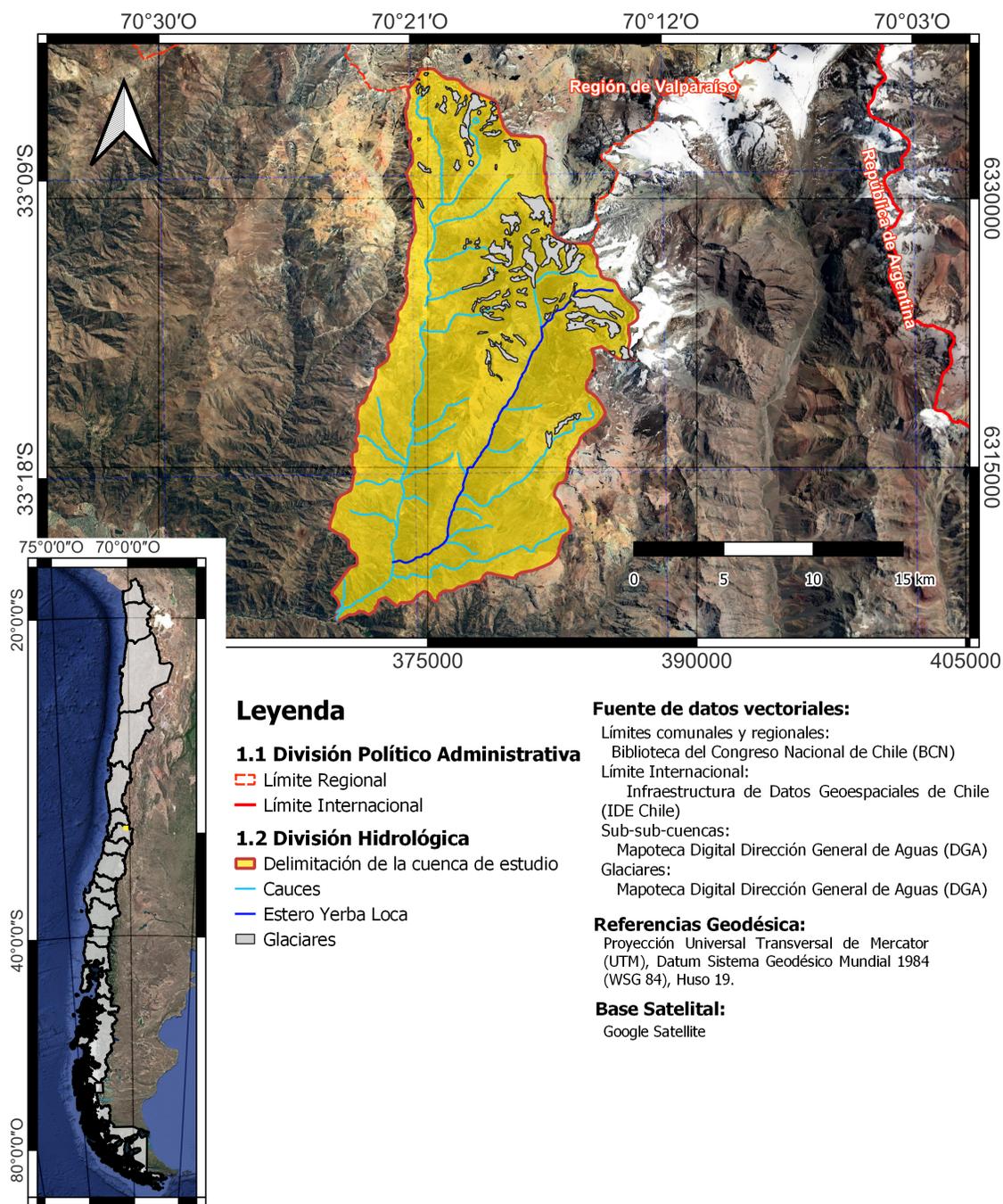


Figura 1.1: Mapa de la Cuenca Río San Francisco, ubicada en Santiago, Región Metropolitana.

## 1.2. Objetivos

En esta sección se presentan los objetivos de este trabajo de título.

### 1.2.1. Objetivo general

El objetivo general de este trabajo corresponde a la realización de un modelo numérico 2D, horizontal y vertical, en el software DuMu<sup>x</sup>, en el cual se modela el transporte subsuperficial de compuestos conservativos en suelos montañosos con drenaje ácido, desde una zona glacial a un estero.

### 1.2.2. Objetivos específicos

El estudio consta de tres objetivos específicos:

1. Elaboración del modelo en el software DuMu<sup>x</sup>, mediante la determinación de los parámetros y geometría a utilizar que se relacionan con el medio y flujo en el cual se transporta el compuesto conservativo ubicado inicialmente en la zona glacial.
2. Determinar el tiempo de transporte del compuesto conservativo entre la zona glacial al estero Yerba Loca.
3. Realizar un análisis de los resultados obtenidos ante una variación de parámetros. Con el objetivo de conocer la diferencia de los tiempos de transporte según la variación realizada y conocer el comportamiento del trazador en distintas condiciones.

## 1.3. Organización del informe

Este trabajo de título se divide de la siguiente manera:

**Capítulo 2 Antecedentes de Estudio:** En este capítulo se presentan diversas fuentes bibliográficas realizadas por otros autores, quienes han abordado trabajos relacionados con el flujo subsuperficial y el transporte de compuestos en un medio poroso. Algunos de estos estudios se llevaron a cabo utilizando el software DuMu<sup>x</sup>, mientras que otros se basan en investigaciones experimentales, y ciertos trabajos se realizaron en otros softwares.

**Capítulo 3 Flujos Subsuperficiales:** En este capítulo se exponen los fundamentos esenciales, incluyendo conceptos básicos y ecuaciones fundamentales, que describen los flujos subsuperficiales en medios porosos.

**Capítulo 4 Zona de Estudio:** En este capítulo se presentan las principales características de la zona de estudio, que abarcan su ubicación, geomorfología, geología, glaciares, tipos de suelo y las áreas con alteración hidrotermal.

**Capítulo 5 Modelación Numérica:** En este capítulo se presenta la conceptualización del modelo, el modelo numérico utilizado y los distintos escenarios simulados. Además, se explica el software DuMu<sup>x</sup> y su utilización en este modelo.

**Capítulo 6 Resultados y análisis:** Se presentan los principales resultados de los escenarios simulados a partir del software DuMu<sup>x</sup> y se exponen los análisis asociados a estos.

**Capítulo 7 Conclusiones:** En este capítulo se presentan las conclusiones de este trabajo, en base a los resultados obtenidos.

# Capítulo 2

## ANTECEDENTES DE ESTUDIO

En este capítulo, se explora la perspectiva de distintos autores que han abordado el problema de la modelación de flujos en medios porosos.

El objetivo de esta búsqueda de bibliografía, sobre la modelación de flujos en medios porosos en zonas saturadas y no saturadas, es una ayuda para mejorar los conocimientos teóricos que se tienen del tema con el fin de desarrollar un modelo de flujo y transporte en medios porosos confiable.

La modelación de flujos subsuperficiales es relevante para distintos tipos de aplicaciones. Es por esto que existen diversos estudios con respecto a la modelación de flujos en zonas saturadas y no saturadas en un medio poroso. Usualmente estos modelos son utilizados para entender los procesos físicos y verificar estudios experimentales (Younes, Fahs, y Ackerer, 2021).

El estudio de Younes et al. (2021) menciona una variedad de trabajos que abordan investigaciones relacionadas con: flujos no-saturado y saturado, flujo en medios porosos fracturados, transporte de compuesto reactivos, entre otros temas. Con respecto a los trabajos sobre los flujos no-saturados y saturados, se destacan estudios que emplean el enfoque de elementos finitos para modelar el flujo de agua en un lecho poroso. Los trabajos publicados en el estudio de Younes et al. (2021) presentan nuevos avances teóricos que buscan mejorar la confiabilidad en la modelación de flujos y transportes de compuestos en un medio poroso. A raíz de esto, se decidió investigar una selección de estudios relacionados con la modelación del flujo de agua en medios porosos, con el fin de reconocer investigaciones que aborden la modelación y estudios de flujos saturados y no saturados en dicho medio.

Radišić (2020) realizó una tesis sobre un modelo matemático y simulación numérica de los flujos en medios porosos con más de una fase y más de un componente. Su estudio consistió en la formulación de un modelo de dos fases y dos componentes con intercambio de masa entre las fases. Se utiliza el software DuMu<sup>x</sup> para la implementación del modelo. El modelo utiliza el método de volúmenes finitos centrado en celdas para el flujo de dos fases inmiscibles y compresibles. Realizó diversas simulaciones numéricas con medios porosos homogéneos. Algunas de estas simulaciones son: la inyección de gas hidrógeno al medio poroso parcialmente saturado, la inyección de gas de hidrógeno en otra posición, el intercambio de flujo entre las dos fases con fuerzas viscosas y presión capilar, y la inyección de gas de hidrógeno en un

medio poroso inicialmente saturado. Además, realizó una simulación numérica en un medio heterogéneo. Varias simulaciones numéricas fueron inspiradas en los casos de pruebas de MoMaS Benchmark, puntos de referencia de la producción de hidrógeno debido a la corrosión del contenedor metálico del depósito de residuos nucleares. Una de las conclusiones que destacó la autora es que el software no cumplió las expectativas con respecto al tiempo de ejecución, pero que cree que este método traerá grandes ventajas cuando se emplee para un flujo de dos fases y multi-componente.

El trabajo de Ahusborde et al. (2015) estudia la simulación numérica de flujos multi-componentes de dos fases con transporte de un compuesto reactivo en un medio poroso. Para resolver la problemática, los autores dividen el problema en dos: primero, presentan la modelación del flujo en dos fases y dos componentes, y luego la modelación del transporte reactivo. El objetivo del trabajo es desarrollar un método numérico para la simulación de flujos con más de un componente, con dos fases y que presentan transportes reactivos en los medios porosos. Este método se utiliza para la captura y almacenamiento geológico de  $\text{CO}_2$ . En estas simulaciones se considera que el medio está completamente saturado y posee concentraciones de  $\text{CO}_2$  en el medio. Los autores mencionan el uso de DuMu<sup>x</sup> y el uso de un modelo implementado en DuMu<sup>x</sup> para la simulación de un flujo de dos fases y dos componentes. El trabajo en sí concentra su información en la metodología empleada para simular el problema. La metodología desarrollada implica resolver las leyes de conservación de masa y transporte de difusión-advección. Los autores presentan dos enfoques: un enfoque acoplado y un enfoque secuencial. El enfoque acoplado resuelve el sistema completo de ecuaciones, mientras que el enfoque secuencial es aplicable a ciertas condiciones. La metodología implica una combinación de métodos numéricos y modelos químicos para simular el transporte del compuesto reactivo a través de flujos en el medio poroso. Para los autores, el software DuMu<sup>x</sup> es una herramienta útil para simular flujos multi-componentes de dos fases, pero a su vez recomiendan una estrategia para desafiar el equilibrio entre lo químico y el movimiento del flujo.

En la investigación de Majdalani y Guinot (2023), se presenta un estudio experimental y de modelación del comportamiento del transporte de un soluto en un medio poroso heterogéneo bajo diferentes tasas de flujo. Los autores reportan diferentes experimentos para estudiar el trazador bajo condiciones hidráulicas estacionarias. El experimento es modelado utilizando el transporte de advección-dispersión multi-regional con dos regiones móviles. La diferencia de este estudio con otros es que este posee un grado de heterogeneidad alto, mientras que los otros experimentos poseen una heterogeneidad media. Además, se estudió únicamente el movimiento del flujo en la horizontal (unidimensional), por lo que la representación es más sencilla de lo que realmente es el transporte del soluto en el medio poroso. A partir de este estudio, se confirmó que el coeficiente de dispersión posee una relación lineal con la tasa de flujo.

Bunsri et al. (2008) estudia la modelación numérica del transporte de trazadores en medios porosos no saturados. Se explica como se desarrolló un modelo numérico para estimar el transporte de los contaminantes en medios porosos, utilizando trazadores. El trazador utilizado fue el cloruro de sodio ( $\text{NaCl}$ ), compuesto conservativo que no se degrada en el sistema. En el estudio se realizaron experimentos con dos concentraciones diferentes del trazador y para dos profundidades diferentes del lecho. La modelación se basa en la solución numérica de las ecuaciones de transporte advección-dispersión y las ecuaciones de Richards. Estas ecuaciones describen el movimiento del trazador a lo largo del medio y se resuelven a través del

método de elementos finitos. La modelación numérica del transporte de trazadores se realizó utilizando el programa MATLAB. A partir de los resultados obtenidos, se concluye que el modelo numérico es útil para estimar el movimiento de contaminantes en medios poroso no saturados y que los datos obtenidos son consistentes con los datos experimentales.

En el artículo de Karmakar et al. (2022) se presenta un estudio que evalúa distintos simuladores de flujos subterráneos y de transporte de solutos. El estudio analiza distintos enfoques de modelación numérica y describe las ventajas y desventajas de varios simuladores en término de previsibilidad, control temporal y eficiencia computacional. Algunos de los simuladores evaluados son: MODFLOW/MT3DMS, FEFLOW, COMSOL Multiphysics y DuMu<sup>x</sup>. Como menciona el artículo, estos simuladores numéricos se basan en tres esquemas de discretización numérica: método de diferencias finitas, método de elementos finitos y método de volúmenes finitos. Concluyen que DuMu<sup>x</sup> generaba resultados estables y convergentes para valores bajos de dispersividad longitudinal. A pesar de esto, los errores relativos son significativamente mayores para los casos de baja dispersividad comparándolo a la solución analítica, este error es prominente en DuMu<sup>x</sup>. Por lo tanto, la convergencia de resultados tiene un costo de dispersión numérica más significativa. Para casos unidimensionales y bidimensionales, todos los simuladores numéricos muestran resultados acordes a los resultados analíticos. Para los cuatro simuladores se concluye que al refinar la malla, disminuir la discretización espacial, se mejora la precisión del resultado.

A partir de los estudios previos expuestos, se destaca que el software DuMu<sup>x</sup> es una herramienta útil en esta memoria, dada su capacidad para modelar flujos y diversos compuestos en un medio poroso saturado y no-saturado. Además, se evidencia su aplicabilidad a través de varios estudios que emplearon DuMu<sup>x</sup> para modelar flujos en medios porosos.

# Capítulo 3

## FLUJOS SUBSUPERFICIALES

En este capítulo se entregan conceptos básicos y ecuaciones que son necesarias para entender, describir y modelar los flujos subsuperficiales. En la Sección 3.1 se describen los principales términos utilizados en los flujos subsuperficiales. Mientras que la Sección 3.2 se explica el medio poroso, donde se señalan sus propiedades y se introduce al término de volumen elemental representativo (REV, *Representative Elementary Volume* por sus siglas en inglés). Las ecuaciones que describen el flujo subsuperficial se encuentran en la Sección 3.3, tanto para un medio poroso saturado como no saturado. La última Sección 3.4 se presentan las ecuaciones gobernantes del modelo para un flujo subsuperficial.

### 3.1. Principales términos y conceptos

El ciclo hidrológico describe el movimiento del agua en sus diferentes estados a lo largo de la naturaleza. Uno de estos es el movimiento del agua a través del suelo, donde este recorrido ocurre en la subsuperficie del suelo. El término de aguas subterráneas nace a partir de este movimiento, en donde se consideran todas las aguas que se encuentran por debajo de la superficie del suelo. Comúnmente, el término aguas subsuperficiales son para las aguas subterráneas que se encuentran en una zona no saturada, mientras que las aguas subterráneas se considera para las aguas ubicadas en la zona saturada (Bear y Cheng, 2010).

Estos dos zonas, saturada y no saturada, están separadas por la capa freática. La zona saturada se encuentra por debajo de esta capa, mientras que la zona no saturada se ubica sobre ella (Fitts, 2002).

### 3.2. Medio Poroso

A continuación se describe las principales propiedades del medio poroso. Además, se explica el volumen elemental representativo (REV, *Representative Elementary Volume* por sus siglas en inglés).

#### 3.2.1. Definiciones y términos

Bear (2018) definió el dominio de medio poroso como un dominio espacial que está parcialmente ocupado por una fase sólida, llamada matriz sólida, mientras que el resto se encuentra ocupado por espacios vacíos o porosos. Estos espacios vacíos pueden ser ocupados por una

o varias fases fluidas, ya sea gas o líquido. Tanto la matriz sólida como los espacios vacíos se encuentran distribuidos por todo el dominio del medio poroso. Se distinguen tres tipos de materiales porosos:

- *Medios porosos naturales*: medios que poseen formaciones geológicas debajo de la superficie del suelo. Estos medios pueden incluir una variedad de tipos de suelos y formaciones geológicas compuestas, como arena, roca fisurada, limo, arcillas, entre otros.
- *Medios porosos fabricados*: son los medios porosos que poseen materiales fabricados como el papel, la cerámica, el caucho, entre otros.
- *Medios porosos orgánicos*: son los medios porosos que poseen materiales del tipo orgánicos, como huesos u órganos.

Adentro del medio poroso existen términos que nos ayudan a estudiar mejor el sistema. Uno de estos es el término *fase*. Una fase es una porción de espacio ocupada por un material con propiedades físicas y químicas uniformes, en donde el comportamiento de este material es igual en toda la porción del espacio. Hay distintos tipos de fases, como la sólida, líquida o gaseosa. Dado que los gases son fluidos miscibles, en un sistema solo puede existir una fase gaseosa, mientras que los líquidos son fluidos inmiscibles, lo que significa que se puede tener una o más fases líquidas. La interfaz es un borde físico que separa las distintas fases. Generalmente, una fase consta de varios *componentes* que pueden ser sustancias químicas puras o de varias sustancias que forman una unidad con propiedades físicas constantes (Flemisch, 2013).

Las fases fluidas se dividen en dos fases: fase que moja (*wetting phase* en inglés) y fase que no moja (*non-wetting phase* en inglés). Según Bear y Cheng (2010), para comprender la diferencia entre estas fases se utiliza el concepto de ángulo de contacto, que es el ángulo formado entre la superficie sólida y la interfaz entre los fluidos. En el caso de que el ángulo fuese menor a  $90^\circ$  significa que ese fluido es el que moja, mientras que si el ángulo fuese mayor que  $90^\circ$  el fluido es el fluido que no moja. En las zonas no saturadas, donde se encuentra aire y agua en los espacios porosos, comúnmente el agua es la fase que moja y el aire es la fase que no moja. En la Figura 3.1, se presenta el ángulo de contacto entre la fase que moja y no moja.

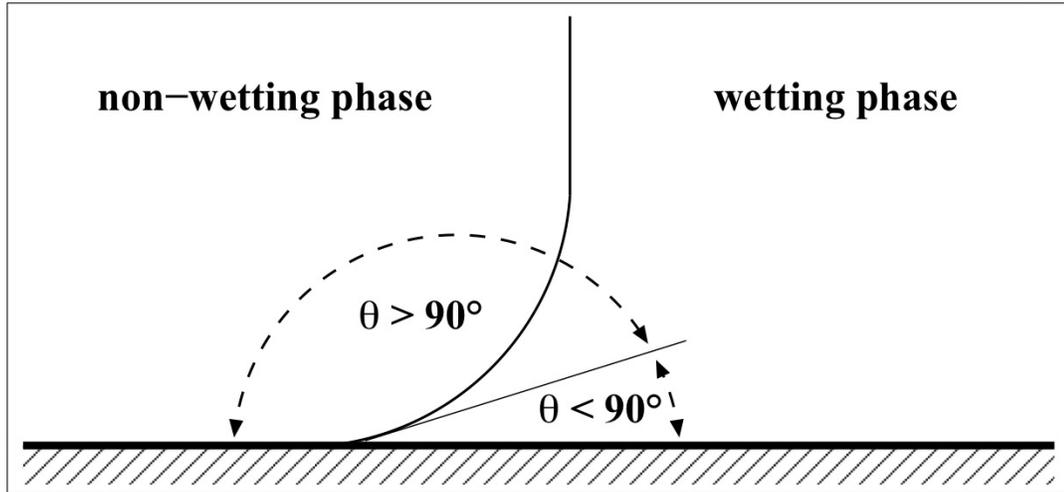


Figura 3.1: Ángulo de contacto entre la fase que moja y que no moja.  
Fuente: Flemisch (2013).

### 3.2.2. Volumen Elemental Representativo

El transporte del flujo subsuperficial se puede modelar a través de distintas escalas espaciales. La ley de Darcy, ley que modela el flujo en las aguas subterráneas y subsuperficiales, requiere una sustitución del conjunto de granos del medio poroso por un medio continuo, y este enfoque continuo se debe llevar a cabo en una escala macroscópica. A partir de esto, Hubbert (1940) solucionó este problema definiendo el término de macroscópico, en donde define el *Volumen Elemental Representativo* (REV, *Representative Elementary Volume* por sus siglas en inglés). Este volumen está relacionado con la porosidad del medio poroso. A medida que el volumen del medio aumenta, la porosidad alcanza un valor constante. El REV es el volumen en el cual la porosidad empieza a ser constante. Además, debe incluir una cantidad suficiente de poros para permitir que el promedio de estos sean estadísticamente significativos para poder considerar el enfoque continuo en el medio poroso (Freeze y Cherry, 1979).

Como resumen, el medio poroso es un dominio espacial que siempre contiene partes sólidas y espacios vacíos bien distribuidos y que es posible encontrar una muestra en su dominio que represente el medio. Esta muestra, conocida como REV, se presenta una matriz sólida y un espacio de vacíos (Bear, 2018).

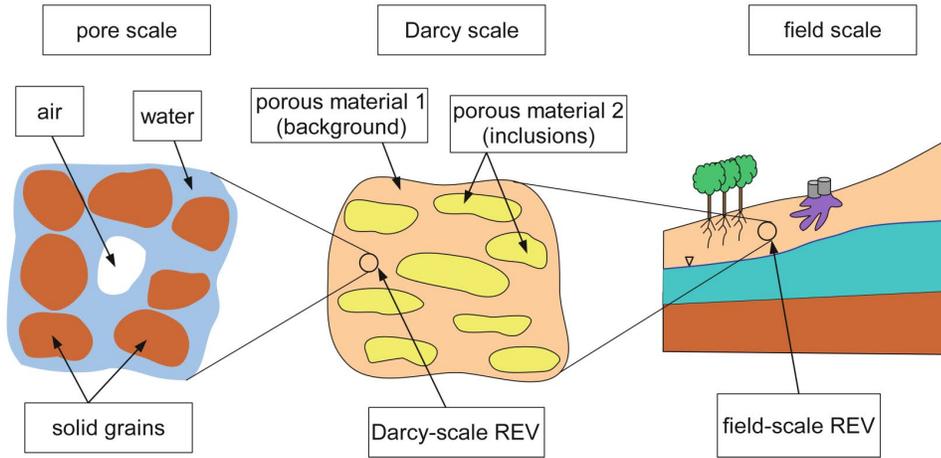


Figura 3.2: Escalas en un medio poroso.  
Fuente: Szymkiewicz (2013).

Como se observa en la Figura 3.2, la escala de Darcy es la escala que utiliza el REV, en donde se tiene una muestra con un dominio a nivel macroscópico.

### 3.2.3. Propiedades del medio poroso

A continuación se presentan propiedades del medio poroso, en donde se señalan las propiedades para la matriz sólida, las propiedades de los fluidos y las propiedades que describen la interacción entre la matriz sólida y los fluidos.

#### 3.2.3.1. Propiedades de la matriz sólida

- Porosidad ( $\phi$ )

Es la relación entre el volumen del espacio poroso o de vacíos ( $V_v$ ) y el volumen total considerado en el REV ( $V_{REV}$ ).

$$\phi = \frac{V_v}{V_{REV}} \quad (3.1)$$

La porosidad depende de la textura y la estructura del suelo (Bear y Cheng, 2010). Los valores de la porosidad del suelo varían dependiendo del tipo de material que se presente. En la Tabla 3.1 se encuentran los valores típicos de algunos suelos.

Tabla 3.1: Rango de porosidades para materiales naturales.  
Fuente: Bear y Cheng (2010).

Material	Porosidad
Tierra turba	0,6-0,8
Suelos	0,5-0,6
Arcilla	0,45-0,55
Limo	0,4-0,5
Arena mixta de grano medio a grueso	0,35-0,4
Arena uniforme	0,3-0,4
Arena mixta de grana fino a medio	0,3-0,35
Grava	0,3-0,4
Grava y arena	0,3-0,35
Depósitos de glaciación	0,1-0,2
Arenisca	0,1-0,2
Pizarra	0,01-0,1
Caliza	0,01-0,1
Roca ígnea fracturada	0,01-0,1
Basalto	0,01-0,25

- **Permeabilidad intrínseca ( $k$ )**

Es un coeficiente que depende únicamente de las propiedades de la configuración de los espacios vacíos y no del fluido. Esta permeabilidad es una porción de la conductividad hidráulica que solamente depende del medio poroso.

$$k = C \cdot d^2 \quad (3.2)$$

La Ecuación (3.2) es una ecuación empírica que relaciona las propiedades geométricas de la matriz sólida. En esta ecuación,  $C$  representa un coeficiente adimensional, y  $d$  es el diámetro efectivo del grano (Bear y Cheng, 2010). El parámetro  $C$  es proporcional y depende de diversas propiedades del medio, tales como la forma del grano, la distribución del tamaño y el empaquetamiento (Dingman, 2015).

La permeabilidad intrínseca puede ser obtenida a partir de pruebas de permeabilidad in situ o en muestras de laboratorio.

### 3.2.3.2. Propiedades del fluido

Las propiedades del fluido dependen de la presión, la temperatura y la composición de la fase en el cual se encuentran. Como se mencionó anteriormente, tanto los gases como los líquidos son fluidos, por lo que se considera que la fase que no moja ( $\alpha = n$ , *non-wetting phase*) al fluido gas y la fase que moja ( $\alpha = w$ , *wetting phase*) como al fluido líquido.

- **Densidad del fluido en la fase  $\alpha$  ( $\rho_\alpha$ )**

Es la proporción de masa ( $M_\alpha$ ) en su volumen ( $V_\alpha$ ) para la fase  $\alpha$ .

$$\rho_\alpha = \frac{M_\alpha}{V_\alpha} \quad (3.3)$$

- **Viscosidad dinámica en la fase  $\alpha$  ( $\mu_\alpha$ )**

Es la fricción en el fluido que resulta a partir de las atracciones entre moléculas. Se caracteriza como la resistencia del fluido a fluir.

### 3.3. Flujo en el medio poroso

#### 3.3.1. Medio saturado

##### 3.3.1.1. Ley de Darcy para medios saturados

La ley que gobierna el flujo del agua a través del medio poroso saturado fue encontrada por Henri Darcy el año 1856 (Dingman, 2015). Según Szymkiewicz (2013), Darcy investigó el flujo vertical del agua en un medio saturado con columnas de arena. A partir de este experimento se formuló la ley de Darcy (ver Ecuación (3.4)), la cual relaciona el flujo del agua con la diferencia de las presiones motrices del agua ( $h^{(1)}$  y  $h^{(2)}$ ), la longitud de la columna ( $L$ ) y el área ( $A$ ) de arena y la conductividad hidráulica ( $K$ ).

$$Q = KA \frac{h^{(1)} - h^{(2)}}{L} \quad (3.4)$$

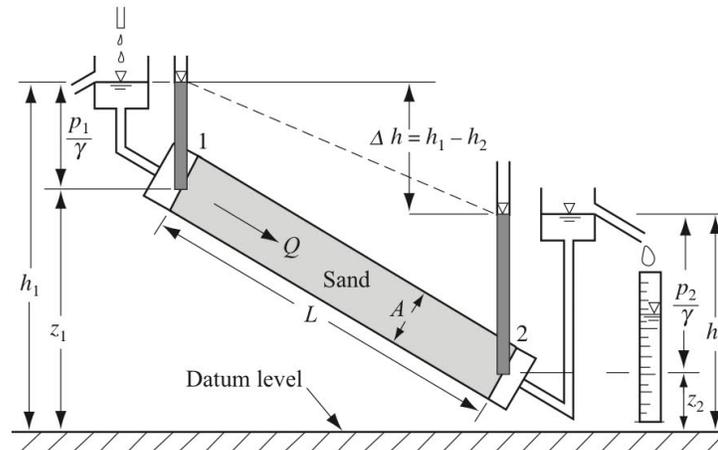


Figura 3.3: Experimento de Henry Darcy con una columna inclinada de arena.

Fuente: Szymkiewicz (2013).

En la Figura 3.3, se muestra el experimento de Darcy en el cual hay un caudal de entrada por el punto 1 y un caudal de salida en el punto 2, donde este pasa a través de una columna inclinada de arena con área transversal  $A$  y largo  $L$ . Las elevaciones ( $h^{(1)}$  y  $h^{(2)}$ ) son alturas piezométricas que se definen como:

$$h = z + \frac{p}{\rho \cdot g} \quad (3.5)$$

donde  $z$  es la elevación del punto considerada a partir del nivel datum,  $p$  es la presión del fluido,  $g$  es la aceleración de gravedad y  $\rho$  es la densidad del fluido.

Considerando la ecuación de la ley de Darcy en dos dimensiones en un medio poroso homogéneo isotrópico y que  $q$  es la descarga específica ( $q = Q/A$ ), se tiene:

$$q = -K(x, y)\nabla h(x, y) \quad (3.6)$$

### 3.3.1.2. Conductividad hidráulica

El coeficiente  $K$  utilizado en la ecuación de la ley de Darcy (ver Ecuación (3.4) y (3.6)) es la conductividad hidráulica del medio poroso. La conductividad es un escalar que expresa la capacidad que tiene el fluido en fluir a través del espacio poroso. Esta propiedad depende tanto del fluido como la matriz sólida (Bear y Cheng, 2010).

La conductividad hidráulica ( $K$ ) se puede expresar como:

$$K = \frac{k\rho g}{\mu} \quad (3.7)$$

donde  $k$  es la permeabilidad intrínseca,  $\rho$  es la densidad del fluido,  $g$  es la gravedad y  $\mu$  es la viscosidad dinámica.

En la Figura 3.4, se observa un rango de valores que la conductividad hidráulica puede tomar dependiendo del tipo de material.



### 3.3.2. Medio no saturado

#### 3.3.2.1. Conceptos y propiedades

Anteriormente se mencionó que en la zona no saturada se encuentran los espacios porosos con gas, fase que no moja ( $\alpha = n$ ), y líquido, fase que moja ( $\alpha = w$ ). Desde ahora se considerará que la fase que moja es agua y la fase que no moja es aire. A partir de Szymkiewicz (2013), se conocen algunos conceptos y propiedades que serán mencionados en esta sección.

- **Fracción volumétrica ( $\theta_\alpha$ )**

La fracción volumétrica es la razón entre el volumen ocupado por la fase  $\alpha$  ( $\alpha \in w, n$ ) en el volumen total del REV.

$$\theta_\alpha = \frac{V_\alpha}{V_{REV}} \quad (3.9)$$

A partir de la suma de las fracciones volumétricas de la fase que no moja y moja, se obtiene la porosidad:

$$\phi = \theta_n + \theta_w \quad (3.10)$$

- **Saturación en la fase  $\alpha$  ( $S_\alpha$ )**

Es la razón entre el volumen de la fase  $\alpha$  en el REV con respecto al volumen de espacios vacíos en el REV.

$$S_\alpha = \frac{V_\alpha}{V_v} \quad (3.11)$$

También puede ser conveniente definir la saturación relacionando la fracción volumétrica con la porosidad:

$$S_\alpha = \frac{\theta_\alpha}{\phi} \quad (3.12)$$

Dado que se considera que en los espacios de poros estará ocupado por fluidos, como líquido o gaseoso, se asume que la suma de las saturaciones de las distintas fases será igual a uno.

$$S_w + S_n = 1 \quad (3.13)$$

Según Szymkiewicz (2013), cuando el medio está saturado y es drenado, existe un punto en el cual no se puede seguir moviendo líquido o agua afuera del medio. La saturación que se encuentra en ese punto es la saturación residual de la fase que moja ( $S_{rw}$ ), donde es la saturación mínima del sistema. La saturación residual de la fase que no moja ( $S_{rn}$ ) es el punto en el cual el medio no puede seguir saturándose. En este caso, la saturación residual de la fase que no moja es la saturación máxima del sistema. Por razones prácticas, las saturaciones son normalizadas, comúnmente llamadas saturaciones efectivas ( $S_{e\alpha}$ ), y son definidas de la siguiente forma:

$$S_{e\alpha} = \frac{S_\alpha - S_\alpha^{min}}{S_\alpha^{max} - S_\alpha^{min}} \quad (3.14)$$

Brooks y Corey (1964) entrega una relación entre agua-aire, donde la saturación efectiva es:

$$S_{ew} = \frac{S_w - S_{wr}}{1 - S_{wr}} \quad (3.15)$$

El denominador 1 de la Ecuación (3.15) a veces es remplazado por la saturación del fluido que moja máximo ( $S_w^{max} = 1 - S_{rn}$ ) (Bear, 2018).

La saturación y la fracción volumétrica son variables que nos permiten conocer las proporciones entre las fases en el medio de espacios porosos.

#### • Curva de retención o función capilar

La relación entre la presión capilar en escala de Darcy y la saturación del agua, fase que moja, es conocida por distintos nombres, como: función capilar, función de succión, curva de retención o curva característica. En la Figura 3.5, se observa la relación entre la presión capilar ( $p_c$ ), la saturación del agua ( $S_w$ ) en un medio poroso, la saturación efectiva  $S_{ew}$ , y la fracción volumétrica ( $\theta$ ). Esta muestra la dependencia de la historia del flujo (histéresis). La *curva de drenaje primario* representa el proceso de secado a partir de un medio poroso saturado, mientras que la *curva de mojado primario* es el proceso de saturar el medio poroso no-saturado. El valor máximo de saturación alcanzado por la *curva de drenaje primario* es igual a uno ( $S_w = 1$ ), mientras que la *curva de mojado primario* es igual a  $1 - S_{rn}$ . El valor  $p_e$  es la presión de aire de entrada o presión burbujeante; normalmente es observada en los medios porosos con granos de tamaño gruesos.

Varios autores han propuesto una expresión analítica de la curva de retención, las cuales relacionan el sistema aire-agua. Las ecuaciones (3.16) y (3.17) son propuestas por Brooks y Corey (1964).

$$S_{ew} = \begin{cases} \left(\frac{p_e}{p_c}\right)^\lambda & \text{para } p_c \geq p_e \\ 1 & \text{para } p_c < p_e \end{cases} \quad (3.16)$$

$$p_c = p_e \cdot (S_{ew})^{-\frac{1}{\lambda}} \quad (3.17)$$

En donde  $\lambda$  es un parámetro que depende de la distribución de los tamaños de los poros del medio poroso.

Considerando que se encuentran dos fases de fluidos: gas ( $\alpha = n$ ) y líquido ( $\alpha = w$ ), la presión capilar se relaciona con las presiones de estas fases. Por lo que se tiene:

$$p_c = p_n - p_w \quad (3.18)$$

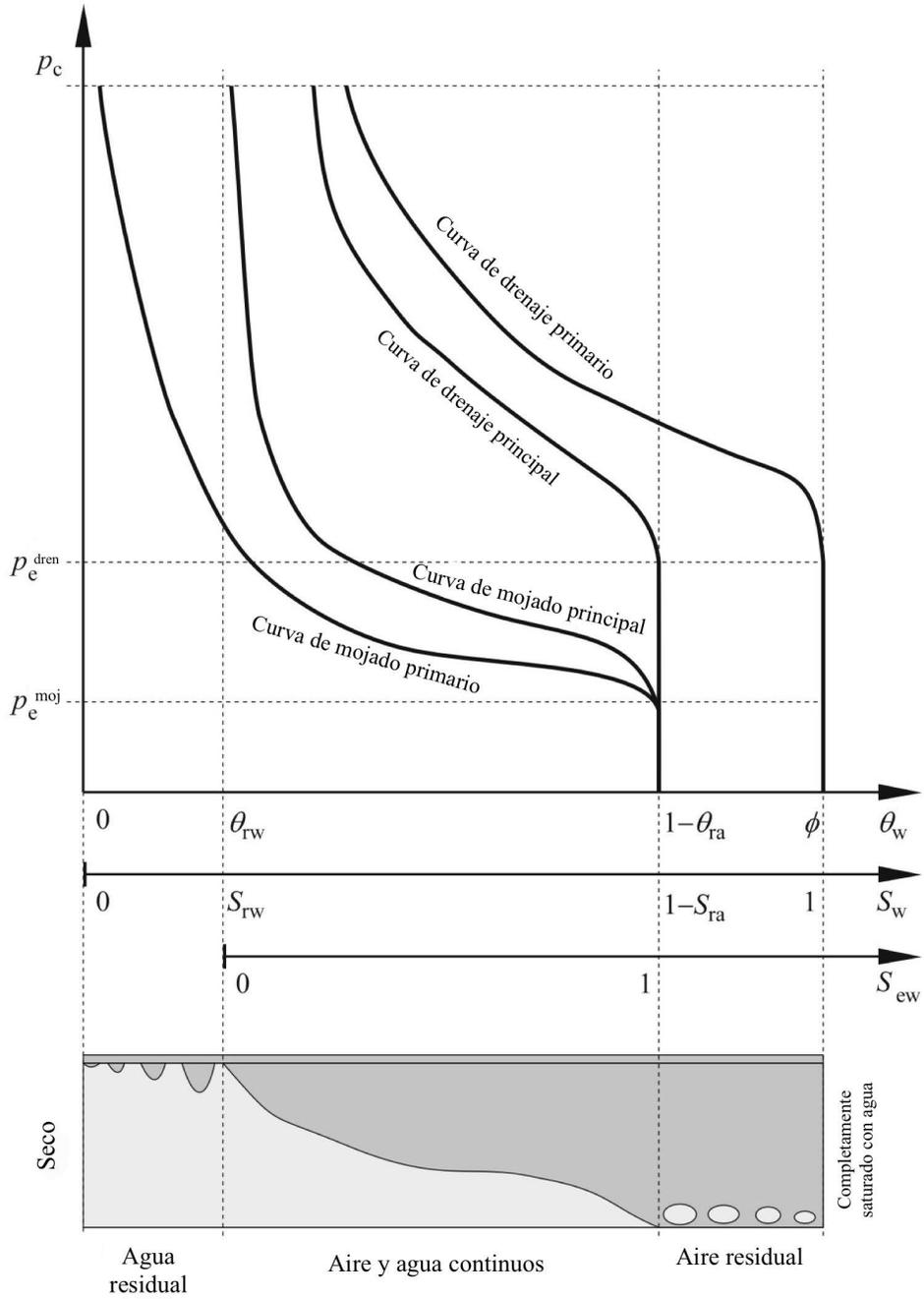


Figura 3.5: Curva de retención, relación entre la presión y la saturación del agua.

Fuente: Szymkiewicz (2013).

• **Permeabilidad relativa en la fase  $\alpha$  ( $k_{r\alpha}$ )**

La permeabilidad relativa describe la capacidad de cada fase fluida para fluir en un medio poroso en función de la saturación de la fase correspondiente. Está varía desde una permeabilidad relativa nula ( $k_{r\alpha} = 0$ ) con una saturación igual a la saturación residual ( $S_\alpha = S_{r\alpha}$ ) a una permeabilidad igual a uno ( $k_{r\alpha} = 1$ ) con una saturación igual a uno ( $S_\alpha = 1$ ). A partir de la Ecuación (3.14), se asume que la saturación mínima es la residual ( $S_\alpha^{min} = S_{r\alpha}$ ) y la máxima es igual a uno ( $S_\alpha^{max} = 1$ ). En el sistema agua-aire, se considera que  $S_w^{min} = S_{rw}$  y

$$S_w^{max} = 1 - S_{rn}.$$

Brooks y Corey (1964) postula una relación entre la permeabilidad relativa con la saturación efectiva del agua o fase que moja en un medio poroso isotrópico:

$$k_{r\alpha} = \begin{cases} S_{ew}^{\frac{2+3\lambda}{\lambda}} & \text{si } \alpha = w \\ (1 - S_{ew})^2 \left(1 - S_{ew}^{\frac{2+\lambda}{\lambda}}\right) & \text{si } \alpha = n \end{cases} \quad (3.19)$$

La Figura 3.6 muestra las permeabilidades relativas en función de la saturación efectiva y la presión capilar.

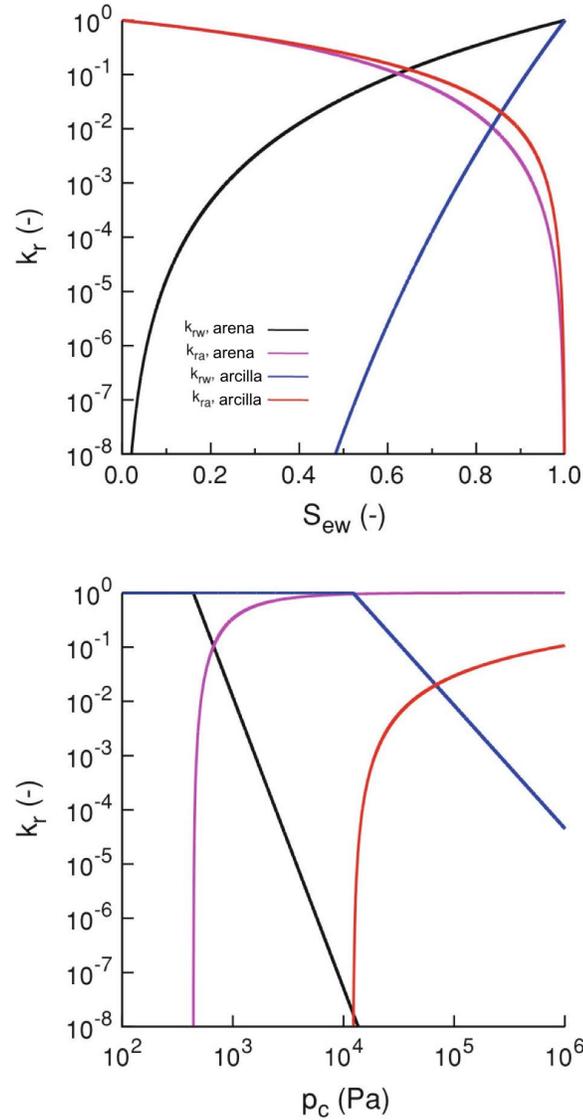


Figura 3.6: Permeabilidad relativa típica para arena y arcilla en función de la saturación efectiva y la presión capilar según Brooks-Corey.  
Fuente: Szymkiewicz (2013).

### 3.3.2.2. Ley de Darcy para medios no saturados

La ley de Darcy describe el movimiento del agua y aire en el espacio poroso. La Ecuación (3.20) describe la ley de Darcy, donde  $\mathbf{v}_\alpha$  es el vector de velocidad,  $\mu_\alpha$  es la viscosidad dinámica,  $p_\alpha$  es la presión,  $\rho_\alpha$  la densidad y  $k_{r\alpha}$  es la permeabilidad relativa en la fase  $\alpha$ . Además,  $\mathbf{k}$  es el tensor de permeabilidad intrínseca y  $\mathbf{g}$  es la aceleración de gravedad. Esto describe el transporte advectivo del flujo.

$$\mathbf{v}_\alpha = -\frac{\mathbf{k} \cdot k_{r\alpha}}{\mu_\alpha} (\nabla p_\alpha - \rho_\alpha \mathbf{g}) \quad (3.20)$$

## 3.4. Ecuaciones Gobernantes

### 3.4.1. Flujo en dos fases

Las ecuaciones gobernantes son generalmente derivadas al realizar los balances de masa, momentum y energía. Estas conservaciones son en la escala de Darcy o escala del REV (Flemisch, 2013).

En la tesis de Flemisch (2013), se menciona que las ecuaciones de balance de masa de un componente (superíndice  $(\kappa)$ ) en un sistema del cual se compone de más de un fluido de flujo (subíndice  $(\alpha)$ ). Generalmente son descritas de la siguiente forma:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\phi \rho_\alpha S_\alpha X_\alpha^\kappa) + \text{div}(\phi \rho_\alpha S_\alpha \mathbf{u}_\alpha + \mathbf{J}_\alpha^\kappa) = I_\alpha^\kappa + q_\alpha^\kappa \quad (3.21)$$

donde  $\rho_\alpha$  es la densidad,  $\phi$  es la porosidad,  $S_\alpha$  es la saturación,  $X_\alpha^\kappa$  es la fracción másica,  $\mathbf{u}_\alpha$  es la velocidad de Darcy,  $\mathbf{J}_\alpha^\kappa$  es el flujo difusivo,  $I_\alpha^\kappa$  es el intercambio de masa entre las distintas fases, y  $q_\alpha^\kappa$  es el término fuente volumétrico que sale o entra del REV. El sistema puede componer de fases fluidas acuosas ( $\alpha = w$ , fase que moja) y gas ( $\alpha = n$ , fase que no moja), además de poseer  $n$  componentes ( $\kappa \in 1, 2, \dots, n$ ).

Al sumar las ecuaciones de balance en función de todos los componentes  $\kappa$ , la Ecuación (3.21) queda como:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\phi \rho_\alpha S_\alpha) + \text{div}(\phi \rho_\alpha S_\alpha \mathbf{u}_\alpha) = I_\alpha + q_\alpha \quad (3.22)$$

En el caso de sumar las ecuaciones de balance en función de todas las fases  $\alpha$ , la Ecuación (3.21) queda como:

$$\sum_\alpha \frac{\partial}{\partial t} (\phi \rho_\alpha S_\alpha X_\alpha^\kappa) + \sum_\alpha \text{div}(\phi \rho_\alpha S_\alpha \mathbf{u}_\alpha + \mathbf{J}_\alpha^\kappa) = q^\kappa \quad (3.23)$$

En vez de utilizar las fracciones másica, se puede utilizar las fracciones molares  $x_\alpha^\kappa$ . Por lo que la ecuación queda:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \sum_\alpha \rho_\alpha^m x_\alpha^\kappa \phi S_\alpha \right) + \sum_\alpha \text{div}(\rho_\alpha^m x_\alpha^\kappa \mathbf{v}_\alpha) + \sum_\alpha \text{div}(\mathbf{J}_\alpha^\kappa) = q^\kappa \quad (3.24)$$

Dentro de estos balances se encuentra la ecuación extendida de Darcy (ver Ecuación (3.20)), que se puede reescribir de la forma:

$$\mathbf{v}_\alpha = \phi S_\alpha \mathbf{u}_\alpha = -\frac{\mathbf{k} \cdot k_{r\alpha}}{\mu_\alpha} (\mathbf{grad} p_\alpha - \rho_\alpha \mathbf{g}) \quad (3.25)$$

Y se encuentra la ecuación de difusión de la ley de Fick:

$$\mathbf{J}_\alpha^\kappa = -\mathcal{D}_{\alpha,pm}^\kappa \rho_\alpha^m \mathbf{grad} x_\alpha^\kappa \quad (3.26)$$

$$\mathcal{D}_{\alpha,pm}^\kappa = \phi \tau_\alpha S_\alpha D_\alpha^\kappa \quad (3.27)$$

$$x_\alpha^\kappa = \frac{n_\alpha^\kappa}{\sum_i n_\alpha^i} \quad (3.28)$$

donde  $\mathcal{D}_{\alpha,pm}^\kappa$  es el coeficiente efectivo de difusión,  $\rho_\alpha^m$  es la densidad molar de la fase fluida  $\alpha$ ,  $x_\alpha^\kappa$  es la fracción molar del componente  $\kappa$  en la fase fluida  $\alpha$ ,  $\tau_\alpha$  es la tortuosidad de la fase fluida  $\alpha$ ,  $D_\alpha^\kappa$  es el coeficiente de difusión molecular, y  $n_\alpha^\kappa$  es la cantidad de moles que posee el componente  $\kappa$  en la fase fluida  $\alpha$ .

Por lo tanto, la ecuación que gobierna el flujo de dos fases es la Ecuación (3.24). Esta muestra el movimiento del flujo y del transporte del componente. Las variables primarias son la presión de la fase que moja  $p_w$ , la saturación de la fase que no moja  $S_n$  y la fracción molar del componente  $x_\alpha^\kappa$  o la presión de la fase que no moja  $p_n$ , la saturación de fase que moja  $S_w$  y la fracción molar del componente  $x_\alpha^\kappa$ , dependiendo de la fase en cuál se encuentra el estado inicial del sistema.

### 3.4.2. Flujos en una fase

En el caso de considerar un medio poroso saturado, solo habría una fase y sería la fase que moja ( $\alpha = w$ ). Por lo que la Ecuación (3.24) con sólo una fase es:

$$\phi \frac{\partial \rho_w^m x_w^\kappa}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_w^m x_w^m \mathbf{v}_\alpha) - \nabla \cdot (\rho_w^m \mathcal{D}_{pm}^\kappa \nabla x_w^\kappa) = q^\kappa \quad (3.29)$$

### 3.4.3. Condiciones Iniciales

El estado inicial del sistema se puede definir a partir de las variables primarias (Bear y Cheng, 2010). Szymkiewicz (2013) define que para el flujo de dos fases la formulación puede ser  $p_n - S_w$  o  $p_w - S_n$ . El caso donde el medio poroso inicialmente se encuentra seco se considera la formulación  $p_n - S_w$ . Esta formulación permite relacionar las presiones de la fase que moja y que no moja con la presión capilar (ver Ecuación (3.30)), y las saturaciones de la fase que moja con la que no moja (ver Ecuación (3.31)).

$$\nabla p_n = \nabla(p_w + p_c) \quad (3.30)$$

$$\frac{\partial S_w}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t}(1 - S_n) = -\frac{\partial S_n}{\partial t} \quad (3.31)$$

En situaciones iniciales donde el medio este no saturado, se tiene:

$$p_w(x, t = 0) = p_w^{init}(x) = -p_c(S_w^{init}) \quad (3.32)$$

$$S_w(x, t = 0) = S_w^{init}(x) \quad (3.33)$$

### 3.4.4. Condiciones de Borde

Las condiciones de borde proporcionan información sobre el comportamiento de los límites físicos del dominio (REV). Szymkiewicz (2013) indicó que existen tres tipos principales de condición de borde ampliamente utilizadas: Dirichlet, Neumann y Robin. En este trabajo, se emplearon las condiciones de Dirichlet y Neumann. A continuación, se definen estas condiciones.

- **Tipo Dirichlet:**

Esta condición entrega valores de la presión o saturación de ambos fluidos (agua y aire). Normalmente se utilizan cuando se conoce la presión del agua, la presión del aire, la saturación del agua, o cuando el borde se encuentra a una distancia considerable del dominio analizado, lo que permite considerar que las condiciones iniciales mantienen la saturación y la presión del agua y del aire constantes e iguales.

- **Tipo Neumann:**

Entrega valores del flujo en la dirección normal del borde. Se utiliza cuando el borde se considera impermeable, no hay intercambio de flujo entre el dominio y el exterior. También se utiliza cuando existe un intercambio de flujos entre el medio y el exterior, y este es un valor conocido.

Las condiciones de borde tipo Robin son explicadas por Bear y Cheng (2010) y Szymkiewicz (2013).

# Capítulo 4

## ZONA DE ESTUDIO

En este capítulo se entrega información sobre la zona de estudio escogida: zona alta del Estero Yerba Loca. En donde se muestran características importantes de la zona.

### 4.1. Ubicación

El Estero Yerba Loca se ubica en el Santuario de la Naturaleza Yerba Loca (SNYL) de la comuna de Lo Barnechea en la Región Metropolitana de Chile. Forma parte de la subsubcuenca hidrográfica del Río San Francisco, que a su vez pertenece a la subcuenca Río Mapocho Alto y a la cuenca del Río Maipo. La subsubcuenca Río San Francisco se extiende entre las longitudes 369000 – 388000 y las latitudes entre 6306300 u - 6337400 utilizando el Sistema Geodésico Mundial 1984 (WSG 84) en huso 19. Se encuentra a unos 35 km de la ciudad de Santiago. En la Figura 4.1, se observa la subsubcuenca Río San Francisco y el Estero Yerba Loca dentro de ella. La subsubcuenca Río San Francisco es una subsubcuenca registrada en la Dirección General de Agua (DGA) y en el informe técnico *Inventario de Cuencas, Subcuencas, y Subsubcuencas de Chile*. En la [Mapoteca Digital](#) se obtienen los archivos SHP de la subsubcuenca.

La zona de estudio abarca la zona alta del Estero Yerba Loca, que esta pertenece a la subsubcuenca Río San Francisco. En la Figura 4.1, se muestra la delimitación de la zona de estudio, resaltada en amarillo.

Esta zona posee una superficie de 24,3 km<sup>2</sup>, lo que representa el 8,15% de la superficie total de la subsubcuenca Río San Francisco.

**Mapa de la delimitación de la Subsubcuenca Río San Francisco - Región Metropolitana, Chile**  
**Escala 1:300.000**

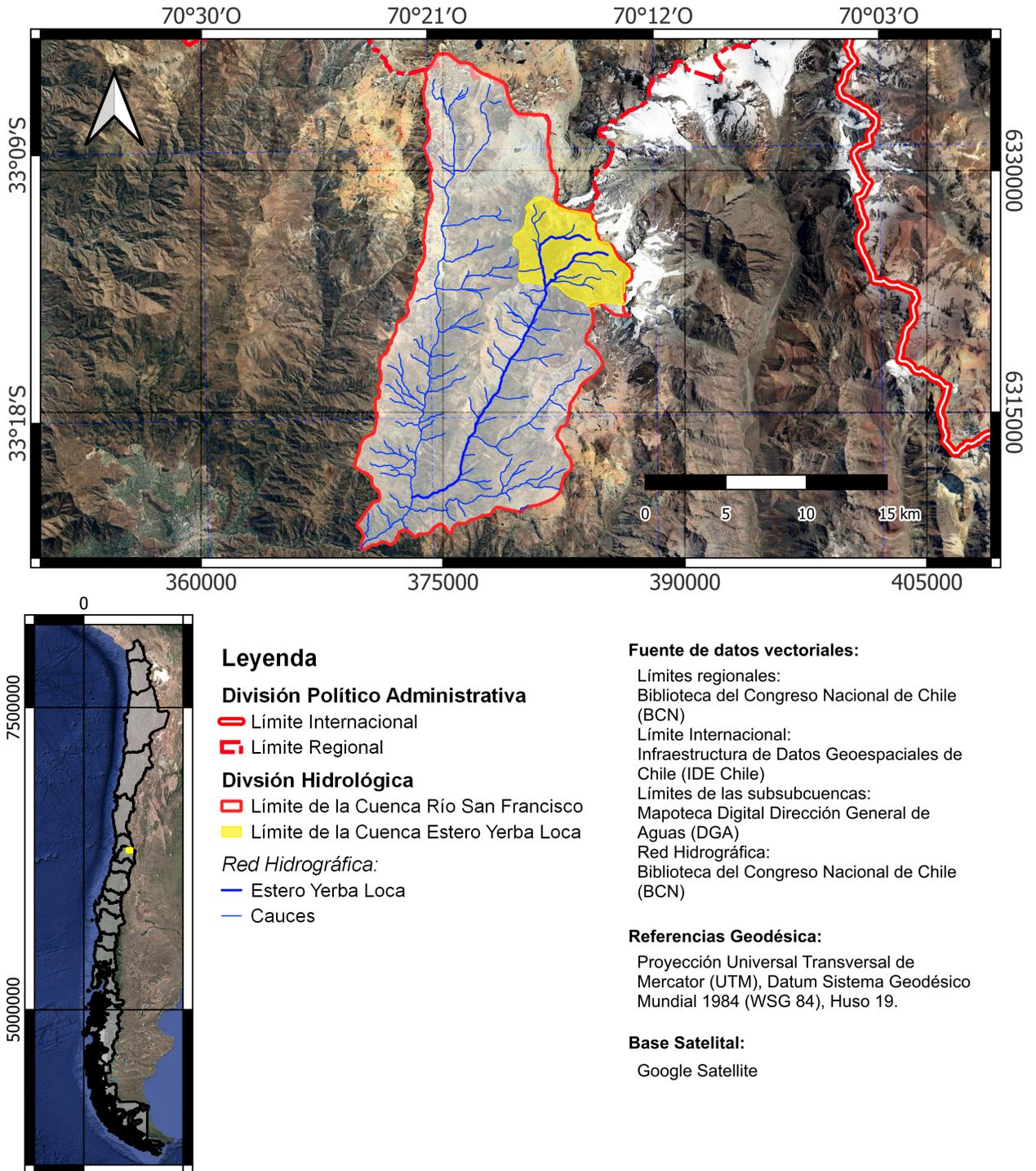


Figura 4.1: Delimitación de la subsubcuenca Río San Francisco en la Región Metropolitana.

## 4.2. Geomorfología

La zona del Estero de Yerba Loca forma parte de la cordillera de Los Andes. Posee los cerros La Paloma (4910 msnm) y Altar (5180 msnm) al norte de la cuenca, mientras que en el oeste se encuentra el cordón de la Sierra Bella y en el este los cerros Leonera (4954 msnm), Pintor (4180 msnm) y La Parva (4050 msnm). Las laderas presentan un aspecto escalonado y abrupto, debido a las variaciones locales de la estratificación del macizo montañoso (Cea et al., 2022).

En la Figura 4.2, se observa la curva hipsométrica de la cuenca Estero Yerba Loca obtenida a partir de la tesis de Marcoleta (2019). La Figura A.1, presentada en la sección A del Anexo, se muestra la ubicación de la cuenca Estero Yerba Loca utilizada para obtener esta curva hipsométrica, al igual que la curva el mapa es creado por Marcoleta (2019). Según Cea et al. (2022), la curva hipsométrica representa un paisaje joven y gran potencial erosiva de la subsubcuenca.

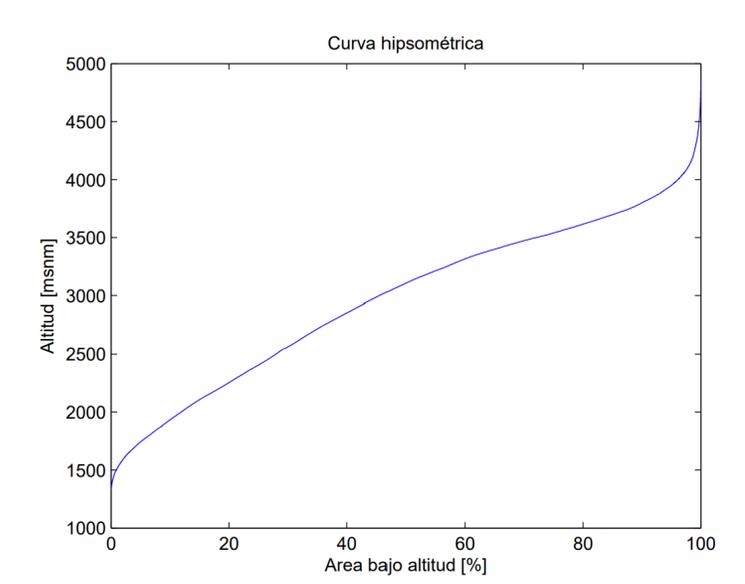


Figura 4.2: Curva hipsométrica de la cuenca Estero Yerba Loca.  
Fuente: Marcoleta (2019).

La zona alta del Estero Yerba Loca tiene una superficie total de 24,3 km<sup>2</sup>, con elevaciones que oscilan entre 3055 msnm - 5373 msnm, y una altitud promedio de 3055 msnm. En la Figura 4.3, se presentan las orientaciones, pendientes y elevaciones de la zona alta del Estero Yerba Loca, la zona de estudio. La estadística de estos parámetros se encuentran en la Tabla 4.1, en donde se muestran los valores máximos, mínimos y medios que se encuentran en la zona. La obtención de estos parámetros geomorfológicos mostrados en la Figura 4.3 se obtienen a partir de los procesamientos de DEMs obtenidos de [SRTM | Earthdata NASA](#).

Mapa de la geomorfología de la Zona de Estudio: Cuenca del Estero Yerba Loca - Región Metropolitana, Chile  
Escala 1:90.000

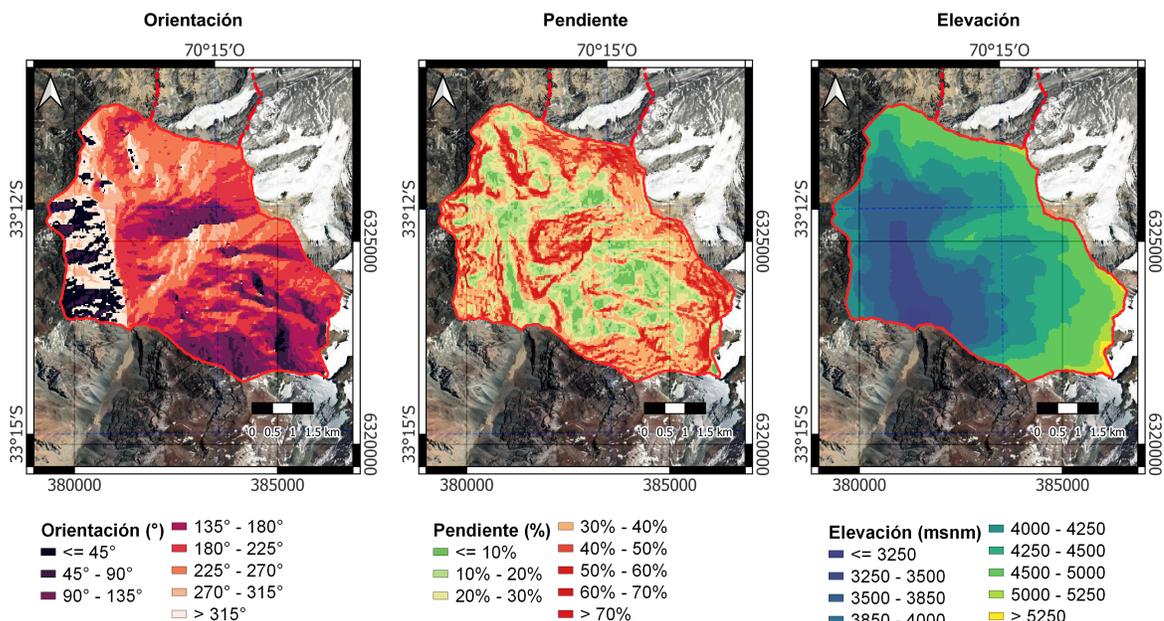


Figura 4.3: Orientaciones, pendientes y elevaciones en la zona de estudio: Zona alta del Estero Yerba Loca.

Tabla 4.1: Estadísticas de los parámetros morfológicos de la zona alta del Estero Yerba Loca.

	Orientación [°]	Pendiente [%]	Elevación [msnm]
Promedio	194,55	31,38	4165,32
Mínimo	0	0	3055
Máximo	360	73,80	5373

### 4.3. Geología e hidrogeología

La estratigrafía de la zona de estudio, desde más antiguo al más joven, comienza con la Formación Abanico y la Formación Farellones, ambas representadas por una secuencia irregular de rocas volcánicas y volcano-sedimentarias. Después de estas formaciones, se encuentra una serie de cuerpos plutónicos y subvolcánicos que corresponden a las rocas intrusivas. La estratigrafía se finaliza con depósitos no consolidados (Hidrica Consultores, 2019).

Las unidades geológicas del sector son principalmente rocas estratigráficas (Formación Farellones), depósitos no consolidados y rocas intrusivas (Jaime Illanes & Asociados, 2019a). Para este trabajo es necesario conocer los depósitos no consolidados que se encuentran en el Estero Yerba Loca, con el objetivo de conocer la geología y el suelo de la zona. Estos fueron definidos por Jaime Illanes & Asociados (2019a), para la Evaluación de Impacto Ambiental

del *Proyecto Los Bronces Integrado*<sup>2</sup>, estos son:

- **Depósitos glaciares (PIHg):** Son depósitos morrenicos (macizos, polimicticos, mal seleccionados) y depósitos glaci-fluviales, estratificados con moderada a media selección.
- **Depósitos aluviales (Ha):** Depósitos macizos, hasta con 4 m de espesor, no poseen una buena selección. Poseen una estratificación incipiente.
- **Depósitos coluviales (Hc):** Depósitos macizos, con una buena estratificación. Son transportados por la gravedad.
- **Depósitos de caída de rocas (Hcr):** Depósitos discontinuos de bloques dispersos y se encuentran en laderas con pendientes fuertes.
- **Depósitos fluvio-aluviales (Hfa):** Son depósitos con estratificación gruesa subhorizontal. Se encuentran seleccionados de bien (fluvio) a mal (aluvio).
- **Depósitos de flujo de detritos (Hfd):** Depósitos de mono a polimicticos, son macizos y poseen una mala selección. Poseen morfologías leves y lóbulos frontales con fuertes pendientes.
- **Depósitos de coluviales antiguos (PIHc):** Depósitos polimicticos, son macizos y poseen una mala selección. Son transportados por la gravedad y tienen pendientes de hasta 32°. Se encuentra parcialmente disectado por cauces actuales o erosionado.

En la Figura 4.4, se muestran las distintas unidades geológicas ubicadas en la Quebrada Yerba Loca.

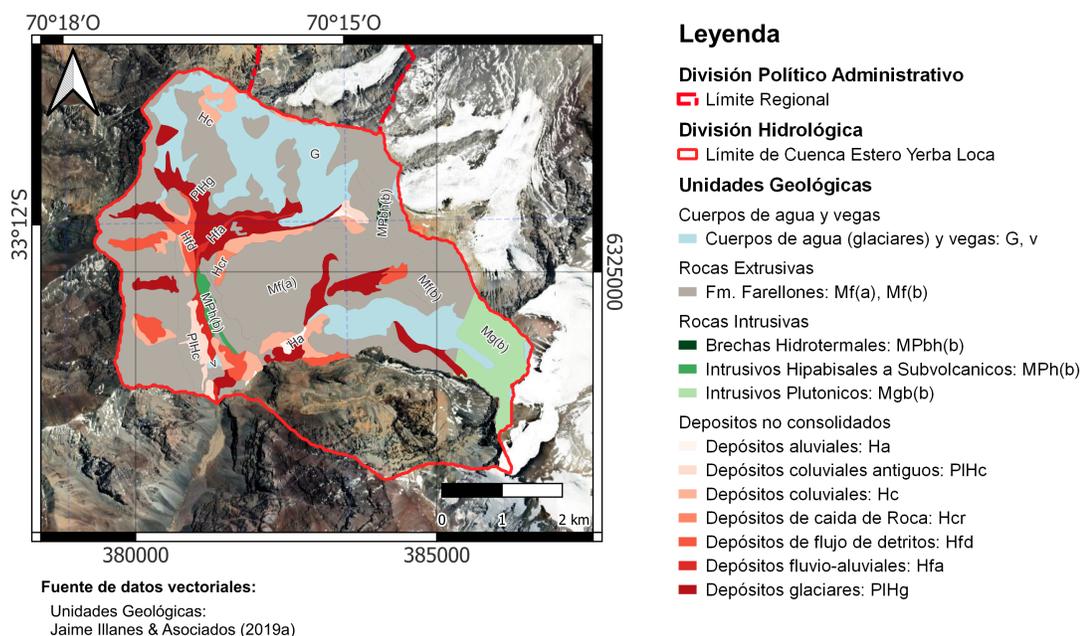


Figura 4.4: Unidades geológicas de la zona alta del Estero Yerba Loca, ubicada en la subsubcuenca Río San Francisco (Escala 1:75.000).

<sup>2</sup> Toda esta información es pública y se encuentra en la [Ficha del Proyecto: Proyecto Los Bronces Integrado](#)

En el caso de la hidrogeología, existe el concepto de contacto primario-secundario, este contacto separa dos tipos de macizos rocosos. Este contacto se entiende como la roca en donde dejan de tener efecto los procesos secundarios - lixiviación y oxidación de los sulfuros - y solo se producen los efectos primarios de mineralización. Se ubica en promedio a profundidades menores a los 100 m (Hidrica Consultores, 2019). La roca secundaria es una roca que permite el transporte del agua, mientras que la roca primaria es totalmente impermeable. Esta última posee fracturas naturales selladas y está ubicada a una mayor profundidad, mientras que la roca secundaria posee un alto grado de fracturamiento y se ubica en una zona más superficial. Por lo tanto, es la roca secundaria en donde el agua escurre (Hidrica Consultores, 2019).

En el estudio de modelación hidrológica, realizado por Hidrica Consultores (2019) para el *Proyecto Los Bronces Integrado*, se consideraron tres unidades hidrogeológicas: roca primaria, secundaria y relleno sedimentario no consolidado. El objetivo de este modelo es identificar la capacidad de transmitir y movilizar el agua a través de estas unidades. Es por esto, que se estudiaron distintos tipos de perfiles hidrogeológicos a lo largo de su área de estudio (ver Figura A.2 presentada en la sección A del Anexo). A partir de estos perfiles, se conocen las elevaciones de contacto primario-secundario en la zona alta del Estero Yerba Loca (ver Figura A.3 presentada en la sección A del Anexo). Además, a partir del perfil hidrogeológico C-C' (ver Figura A.4 presentada en la sección A del Anexo) se acota el área de estudio para el modelo numérico de flujos subsuperficiales. En la Figura 4.5 se presenta la ubicación del perfil hidrogeológico en la Quebrada Yerba Loca.

## 4.4. Glaciares

La zona posee glaciares de montaña, de valle, rocosos y glaciaretos. Los glaciares que se encuentran cercano al Estero Yerba Loca son: Glaciar del Rincón (DR en la Figura 4.5), Glaciar Paloma Oeste (PO en la Figura 4.5), Glaciar Altar Sur (AS en la Figura 4.5), y Glaciar Paloma Este (PE en la Figura 4.5). Según Casassa et al. (2015), los glaciares tienen una influencia significativa en el aporte hídrico del Estero Yerba Loca. En el caso del glaciar Paloma Este, la estimación de aporte hídrico anual medio entre los años 2014 y 2015 es de 0,264 L/(s ha) (Casassa et al., 2015), por lo que se caracteriza como el glaciar con mayor relevancia de aportación hídrica en la zona. Cabe destacar, que este aporte hídrico no diferencia el aporte superficial con el subterráneo, por lo que es una estimación de aporte hídrico a la cuenca. En la Figura 4.5 se muestra los glaciares ubicados en la zona alta del Estero Yerba Loca junto con su red hidrográfica y perfiles hidrogeológicos.

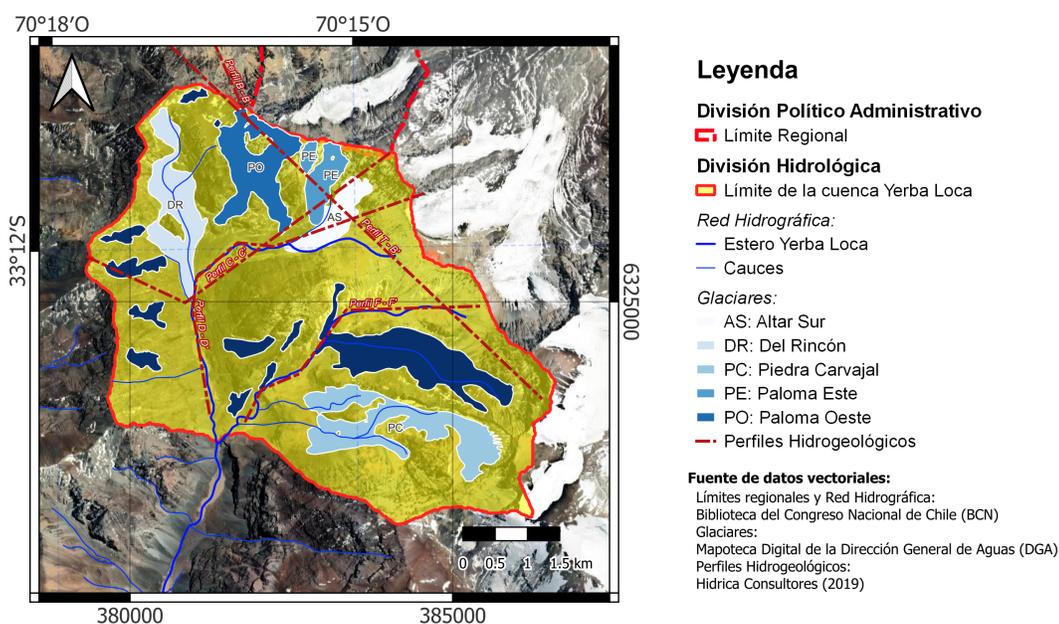


Figura 4.5: Glaciares y perfiles hidrogeológicos en la cuenca Estero Yerba Loca (Escala 1:70.000).

La hidrología de la cuenca Estero Yerba Loca se ve influenciada por los aportes hídricos de los deshielos. En la época invernal, el aporte es mediante las importantes nevadas, mientras que en la época estival es mediante los deshielos de los glaciares presentes. Este aporte hídrico se ve incrementado en los meses de noviembre, diciembre, enero y febrero (Marcoleta, 2019).

## 4.5. Suelo

A partir del informe técnico de Jaime Illanes & Asociados (2019b), se conoce que las áreas de suelo poseen un desarrollo casi nulo, lo que significa que carecen de una presencia significativa de desarrollo humano. Generalmente corresponden a sectores con clase de capacidad de uso VIII<sup>3</sup>, donde las pendientes son abruptas y la pedregosidad<sup>4</sup> superficial es abundante. En sectores con elevaciones mayores a 3.000 m.s.n.m. se presentan precipitación en forma sólida y son comunes las heladas. De todas formas, se logran desarrollar humedales.

Los suelos muestran abundante pedregosidad tanto en la superficie como en la profundidad. En cuanto a las texturas, estas variaron entre medias, franco limosas y francas, y gruesas, franco arenosas. Se destaca la baja presencia de partículas de arcillas (Jaime Illanes & Asociados, 2019b).

<sup>3</sup> Corresponden a suelos sin valor agrícola, ganadero o forestal. Su uso está limitado solamente para la vida silvestre, recreación o protección de hoyas hidrográficas.

<sup>4</sup> Suelos entre 15 y 35 % de gravas o piedras en volumen.

## 4.6. Alteración hidrotermal

La zona de estudio presenta un sistema de rocas hidrotermales alteradas en la superficie que causa un ARD. Esto ocurre debido al contacto de fluidos a través de las rocas que contienen minerales sulfurados (Zegers et al., 2021).

Según Toro et al. (2012), en la zona alta del Estero Yerba Loca se encuentra un complejo de brechas cementadas ígneo/hidrotermal, donde existen dos centros de mineralización de cobre de estilo pórfido llamados Los Sulfatos y La Paloma. Cuando estos centros interactúan con agua proveniente de derretimiento de nieve y glaciares, así como con el aire, es común la generación de drenaje ácido de roca (ARD) (Valenzuela-Díaz et al., 2020). Cabe destacar, que en la zona alta del estero hay ausencia de suelo o vegetación, por lo que el contacto de agua y roca es más común y probable (Valenzuela-Díaz et al., 2020).

En la tesis de Navarrete-Calvo (2020), se presenta un mapa en el cual se delimita la zona de alteración hidrotermal en la zona alta del Estero Yerba Loca (ver Figura A.5 presentada en la sección A del Anexo). En la Figura 4.6 se presentan los glaciares y la ubicación de la zona de alteración hidrotermal.

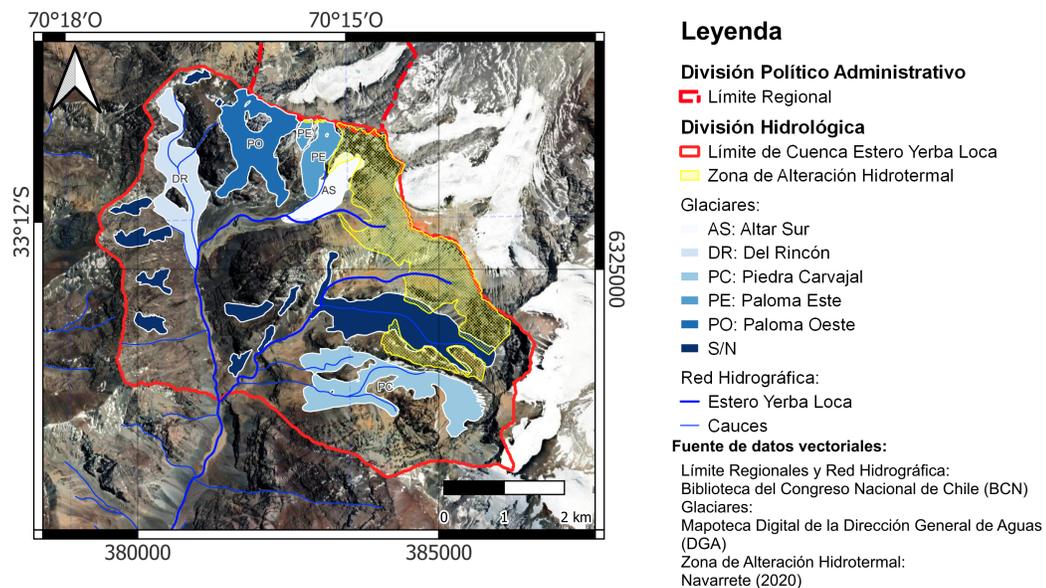


Figura 4.6: Zona de alteración hidrotermal y glaciares en la zona alta del Estero Yerba Loca (Escala 1:75.000).

# Capítulo 5

## MODELACIÓN NUMÉRICA

En este capítulo se presentan las metodologías utilizadas para la obtención del modelo numérico del flujo subsuperficial.

### 5.1. Software DuMu<sup>x</sup>

DuMu<sup>x</sup> es un simulador numérico de código abierto para procesos de flujo y transporte en medios porosos, incluyendo flujos monofásicos o multifásicos. Este software, desarrollado por el Instituto de Hidráulica, Hidrología y Gestión del Agua de la Universidad de Stuttgart, permite modelar sistemas hidráulicos en medios porosos, y es aplicado en diversas áreas, como: gestión de recursos hídricos, exploración de petróleo y gas, ingeniería geotecnia, y en investigaciones de ciencias ambientales. Esta herramienta permite simular y analizar el comportamiento de los fluidos y los contaminantes en medios porosos (Koch et al., 2021).

Se estructura como un marco modular, lo que permite flexibilidad y modificabilidad (Koch et al., 2021). Está construido sobre DUNE<sup>5</sup>, un software numérico científico de código abierto para resolver ecuaciones diferenciales parciales (EDP). Está escrito en C++ y proporciona múltiples administradores de malla (Flemisch et al., 2011). Estas EDP se obtienen a partir de las ecuaciones gobernantes para un flujo bifásico, como lo visto en la Sección 3.4.

Las EDP están discretizadas de manera espacial y temporal. Según Flemisch et al. (2011) y Koch et al. (2021), DuMu<sup>x</sup> ofrece diferentes opciones para la discretización temporal, incluidos los métodos de diferencias finitas de Euler hacia atrás (método de Euler implícito) y de Euler hacia adelante (método de Euler explícito). La elección del método depende del problema que se está resolviendo y de la precisión deseada a la solución. En el caso de la discretización espacial, se pueden utilizar tres métodos: método de volúmenes finitos centrados en celdas, método de caja (*Box Method*) y cuadrícula escalonada. La elección entre estos métodos depende del tipo de problema que se pretenda resolver. Para esta memoria se utilizó el método de volúmenes finitos centrados en celda. DuMu<sup>x</sup> para este método posee los métodos TPFA<sup>6</sup> y MPFA<sup>7</sup>, en donde se diferencian en la cantidad de puntos utilizados para aproximar el flujo que cruza entre las caras de las celdas. El método TPFA sólo utiliza dos puntos, mientras que el MPFA utiliza múltiples puntos.

<sup>5</sup> DUNE: *Distributed and Unified Numerics Environment*.

<sup>6</sup> TPFA: *Two-Point Flux Approximation*. En español, aproximación de flujo de dos puntos.

<sup>7</sup> MPFA: *Multi-Point Flux Approximation*. En español, aproximación de flujo multipunto.

Las EDP que describen el flujo bifásico en un medio poroso, a partir de la discretización espacial y temporal, suelen exhibir un nivel significativo de no linealidad. Es por esto que DuMu<sup>x</sup> utiliza el método numérico de Newton para resolver sistemas de EDP no lineales (Scheer et al., 2021).

DuMu<sup>x</sup> ofrece distintos modelos, donde estos se dividen en cuatro categorías: flujo en medio poroso, flujo libre, geomecánica, y multidominio. La categoría de flujo en medio poroso contiene los modelos relacionados con los flujos en escala Darcy y los fenómenos de transporte en el medio poroso (Scheer et al., 2021).

## 5.2. Consideraciones previas

El objetivo del modelo es estimar los tiempos de tránsito de un compuesto inerte o trazador a través de un lecho poroso. Para esto, se considera la máxima longitud que puede recorrer el compuesto y el flujo entre la zona glacial y el estero.

A partir de los antecedentes de la zona de estudio mencionados en el Capítulo 4, se considera un dominio de simulación para el modelo (ver Figura 5.1), que considera una subsuperficie como un medio poroso que puede estar no saturado o saturado. Las dimensiones consideradas en el modelo bidimensional fueron determinadas a partir de los antecedentes del perfil hidrogeológico obtenido del informe técnico de Hidrica Consultores (2019) (ver Figura 4.5). Se utilizó el perfil hidrogeológico C-C' ubicado en el mapa hidrogeológico (ver Figura A.2 presentada en la sección A del Anexo) y sus dimensiones señaladas en el Figura A.4 presentada en la sección A del Anexo. En la Tabla 5.1 se muestran las dimensiones consideradas, donde se señalan los valores de los largos del glaciar ( $L_{Glaciar}$ ), medio poroso ( $L_{MedioPoroso}$ ), entre la roca impermeable y el glaciar ( $L_{RG}$ ), entre el glaciar y el extremo del lecho ( $L_{GE}$ ), y la profundidad del lecho poroso ( $Prof_{MedioPoroso}$ ).

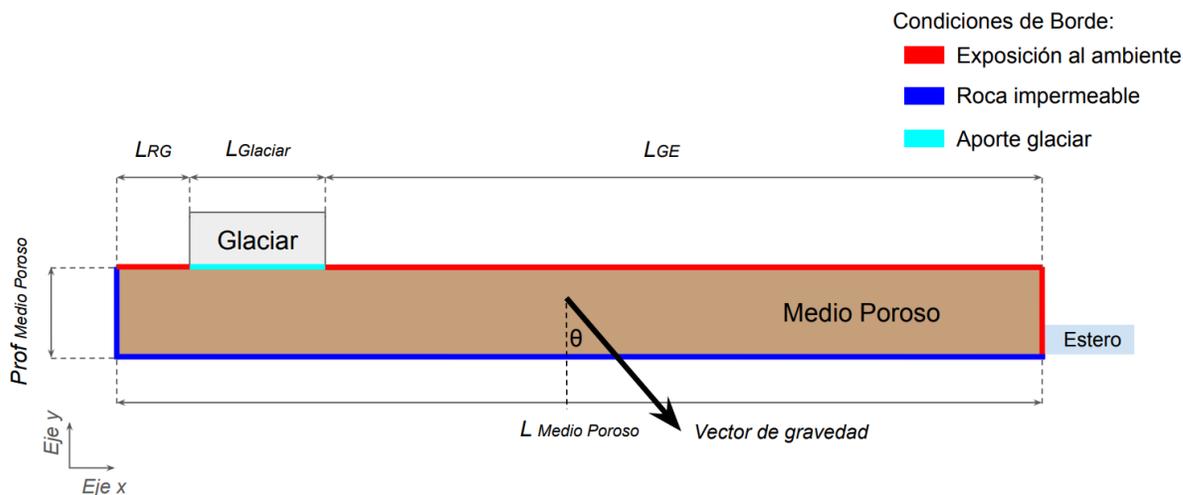


Figura 5.1: Esquema del modelo conceptual y condiciones de borde consideradas.

Tabla 5.1: Dimensiones del esquema de modelo conceptual considerado.

Parámetro	Unidad	Valor
$L_{RG}$	m	30
$L_{Glaciar}$	m	450
$Prof_{MedioPoroso}$	m	50
$L_{GE}$	m	1020
$L_{MedioPoroso}$	m	1500

En este modelo se consideran tres tipos de condiciones de borde. La primera condición (borde de rojo en la Figura 5.1) representa la exposición del suelo al ambiente y esta se presenta en el borde derecho y superior. En el caso de la segunda condición (borde celeste en la Figura 5.1), esta representa el contacto entre el glaciar y el medio poroso, en donde existe una entrada de flujo al suelo debido al aporte hídrico del glaciar. La última condición (borde azul en la Figura 5.1) representa el contacto del suelo con una roca impermeable.

Las condiciones iniciales, con respecto al lecho, se considera relativamente seco y sin presencia de concentraciones del compuesto estudiado. La saturación de la fase que moja ( $S_w^{init}$ ) es de  $0,153 \text{ m}^3/\text{m}^3$  para un lecho poroso arenoso y de  $0,127 \text{ m}^3/\text{m}^3$  para un lecho franco-limoso. Se utilizaron estos valores basándose en su saturación residual, los cuales fueron elegidos con un margen del 10 % superior a su valor residual<sup>8</sup>. La temperatura y presión inicial dependen del escenario que se esté evaluando, dado que son las temperaturas y presiones que se encuentran en el ambiente del escenario.

Como se mencionó en la Sección 3.2, el medio poroso se compone por un volumen de sólidos y un volumen de vacíos, pudiendo estar este último ocupado por un líquido o un gas. En el modelo se consideran tres componentes: agua, aire y compuesto inerte, donde estos pueden estar en los espacios vacíos del medio poroso modelado. Respecto al flujo de entrada al medio, se considera el agua como un fluido líquido con densidad de  $1000 \text{ kg}/\text{m}^3$ , viscosidad dinámica de  $0,001 \text{ Pa s}$  (1 cP) y masa molar de  $1,8 \times 10^{-3} \text{ kg}/\text{mol}$ . El aire se considera como un gas ideal. El trazador posee una masa molar igual a  $1,008 \times 10^{-3} \text{ kg}/\text{mol}$  y su concentración al ingresar al lecho es de  $0,1 \mu\text{g}$ . Las fases del flujo, fase que moja o no moja, se consideran fluidos líquidos inmiscibles y gases compresibles.

Con respecto a la matriz sólida, se consideró dos tipos de texturas de lechos: arenoso y franco-limoso, esto debido a lo mencionado en los antecedentes de la zona de estudio. En la Tabla 5.2 se muestran las características de ambas texturas consideradas a partir de Dingman (2015).

En relación con el aporte hídrico del glaciar hacia el lecho poroso, se considera como referencia los valores estimados por Casassa et al. (2015) del glaciar Paloma Este.

<sup>8</sup> Saturación residual de la fase que moja para un lecho arenoso es de 0,139, mientras que para un lecho franco-limoso es de 0,115

Tabla 5.2: Características de los dos tipos de texturas de lechos.  
Fuente: Dingman (2015)

Características	Unidad	Tipo de textura	
		Arenosa	Franco-Limoso
$p_e$	Pa	1187	7710
$\lambda$	-	0,25	0,19
$S_{rw}$	$\text{m}^3/\text{m}^3$	0,139	0,115
$S_{rn}$	$\text{m}^3/\text{m}^3$	0,053	0,148
$\phi$	$\text{m}^3/\text{m}^3$	0,395	0,485
$k$	$\text{m}^2$	$1,79 \times 10^{-11}$	$7,34 \times 10^{-13}$

### 5.3. Modelo numérico

En el Capítulo 3 se menciona que el medio poroso, en este modelo representado por la subsuperficie, posee 3 fases: sólida ( $\alpha = s$ ), que moja ( $\alpha = w$ ) y que no moja ( $\alpha = n$ ). Las fases que moja y no moja se encuentran en los espacios vacíos o porosos, mientras que la fase sólida en la matriz sólida. La implementación utilizada se basa en el modelo preexistente en el software DuMu<sup>x</sup>, conocido como *2pnc* (*2 phases, n components*). Este modelo representa el flujo de Darcy en un medio poroso con dos fases y multicomponentes. Se caracteriza por su esquema totalmente implícito y representa un flujo de dos fases de dos fluidos parcialmente miscibles y compresibles ( $\alpha \in \{w, n\}$ ). Además, este fluido está compuesto por  $n$  componentes ( $\kappa \in \{agua, aire, \dots\}$ ). La fase sólida se considera como un único componente, y el balance de masa se rige por los términos de almacenamientos y fuentes.

El modelo se rige por las Ecuaciones (3.24), (3.25), (3.26) y (3.27), presentadas en la Sección 3.4, para mayor detalla ver esta sección.

Para cerrar el modelo numérico, es esencial contar con las relaciones constitutivas que se presentan en las Ecuaciones (3.13) y (3.18). Estas relaciones son:

$$S_w + S_n = 1 \qquad p_c = p_n - p_w$$

Además, es importante considerar que todas las fases están completamente definidas con sus respectivos componentes (ver Ecuación (5.1)) y existe el equilibrio local líquido-vapor (ver Ecuación (5.2)).

$$\sum_{\kappa} x_{\alpha}^{\kappa} = 1 \qquad (5.1)$$

$$f_n^{\kappa} = f_w^{\kappa} \qquad (5.2)$$

donde  $f_{\alpha}^{\kappa}$  es la fugacidad del componente  $\kappa$  en la fase  $\alpha$ . La fugacidad se define como:

$$f_{\alpha}^{\kappa} = \Phi_{\alpha}^{\kappa} x_{\alpha}^{\kappa} p_{\alpha} \quad (5.3)$$

donde  $\Phi_{\alpha}^{\kappa}$  es el coeficiente de fugacidad, depende de la presión y la temperatura. La fugacidad puede ser representada como la presión efectiva que ejerce un gas real (Reid, 2013).

Se considera las expresiones de Brooks y Corey (1964), estas relacionan los diferentes parámetros. En las Ecuaciones (3.17) y (3.19) se observan las relaciones entre la presión capilar ( $p_c$ ), la saturación efectiva ( $S_e$ ) y la permeabilidad relativa ( $k_r$ ). Estas ecuaciones están definidas en la Sección 3.3.

## 5.4. Escenarios simulados

Con el objetivo de poder analizar el tiempo máximo de transporte del trazador en un lecho poroso, que se estima a partir de suponer que este componente inerte ingresa a través del derretimiento glaciar y sale por las aguas que afloran. En total, se llevaron a cabo 88 simulaciones, siendo 66 del caso de Gravedad No Inclinada (GNI) y 22 del caso de Gravedad Inclinada (GI).

### 5.4.1. Gravedad No Inclinada (GNI)

En este caso se considera el esquema del modelo conceptual (ver Figura 5.1) y se considera el vector de gravedad perpendicular a la superficie del lecho poroso. Además, el aporte hídrico desde el glaciar entra perpendicular a la superficie del lecho. En la Figura 5.2 se muestra la representación de la dirección del vector de gravedad y del aporte hídrico del glaciar.

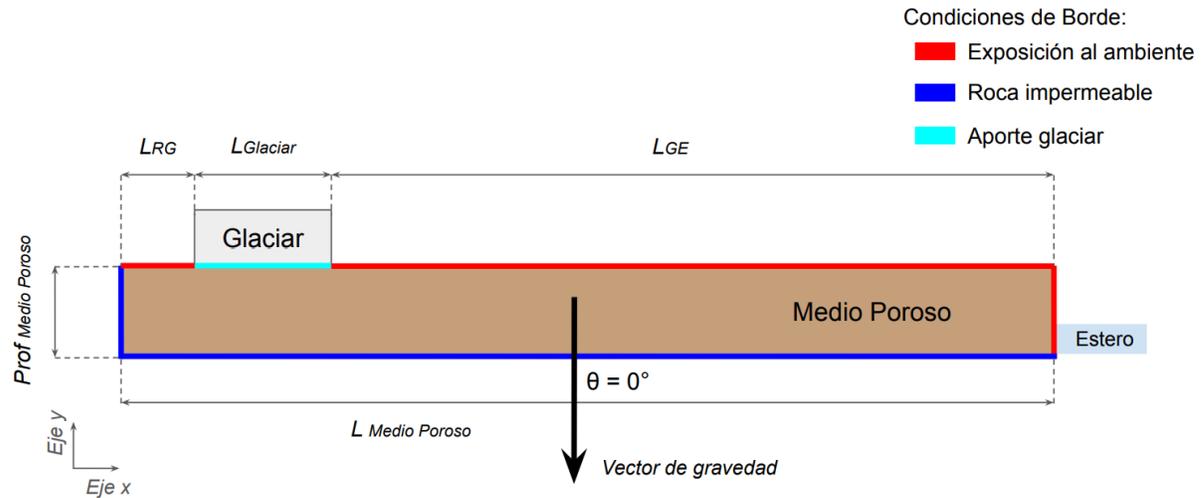


Figura 5.2: Esquema del modelo conceptual del caso de gravedad no inclinada.

Dentro de este caso se consideran cuatro tipos de escenarios que dependen de la estacionalidad, por lo que varían en el aporte hídrico por parte del glaciar, la temperatura y la presión del ambiente. Si el aporte hídrico, presión y temperatura es mayor se atribuye a una condición de verano, en el caso contrario es una condición de invierno. En la Tabla 5.3 se

señalan los valores utilizados para cada escenario con respecto al aporte hídrico, temperatura y presión. El valor del Escenario 2 es el presentado por Casassa et al. (2015), en donde se menciona que la estimación de aporte hídrico anual medio entre los años 2014 y 2015 en el glaciar Paloma Este es de 0,264 L/(s ha). Con respecto a los otros escenarios, se consideraron dos caudales de invierno y verano, en donde se determinó que el caudal de verano (Escenario 4) es mayor que el Escenario 2 por 270 %, mientras que el de invierno (Escenario 1) es menor por aproximadamente un 2,7 %. El Escenario 3 es el promedio de los escenarios 1 y 4. Cada escenario posee dos texturas a estudiar: arenosa y franco-limosa, donde cada textura se presentan de manera homogénea en el medio poroso.

Tabla 5.3: Valores evaluados para cada escenario según su estacionalidad.

Parámetro	Unidad	Escenarios			
		1	2	3	4
Aporte hídrico	L/(m <sup>2</sup> d)	0,06	2,27	3,10	6,14
Temperatura ambiente <sup>a</sup>	°C	1,7	4,3	4,3	6,9
Presión <sup>b</sup>	Pa	51156	51640	51640	52124
Estación		Invierno	Promedio Anual	Promedio Anual	Verano

<sup>a</sup> La temperatura ambiente es obtenida del Centro de Ciencia del Clima y Resiliencia (CR2) del **Explorador Climático** para la estación Estero Yerba Loca en Piedra Carvajal (Cód. DGA: 05721017) entre los años 2015-2020.

<sup>b</sup> La presión atmosférica es obtenida a partir del Estudio de Impacto Ambiental del Proyecto Los Bronces Integrado.

Con el objetivo de brindar un mayor análisis, se estudia el tiempo de llegada según la variación de tres parámetros: la profundidad del lecho poroso, el área de inyección y el largo del lecho desde el glaciar al extremo del lecho ( $L_{GE}$ ) (ver Figura 5.1). Por lo que en cada escenario con su respectiva textura se tienen las diferentes variaciones.

Se considera el Caso Base como el caso el cual posee una profundidad de 50 m en el lecho poroso, una área de inyección de 450 m para el aporte hídrico al lecho, y un largo en el medio poroso de 1500 m ( $L_{MedioPorouso}$ ). Además, a raíz de una variación en la cantidad de celdas que posee la malla se determinó que la malla del Caso Base posee celdas de tamaño de 2 m x 2 m ( $\Delta x = \Delta y = 2$  m), por lo cual se posee 18750 celdas en la malla. Esto dado que el error relativo entre cantidad de celdas en la malla varía en  $\pm 5$  % al aumentar o disminuir la resolución de la malla en un 400 %. Se optó por utilizar esta malla debido a que el resultado del tiempo de llegada del compuesto al estero no se veía afectado significativamente al variar la cantidad de celdas, y se consideró que un error de 5 % es aceptable. Además, al considerar una malla más fina, el tiempo de ejecución del modelo aumentaría considerablemente, lo que dificultaría la realización de todas las simulaciones planificadas. Esto determinó a partir de comparar los tiempos de tránsitos del compuesto en el lecho arenoso y franco-limoso en el Escenario 2. A partir de este Caso Base se realizan las variaciones de: profundidad, área de inyección y largo en el lecho para los distintos escenarios y texturas de los lechos. En total, se realizaron 90 simulaciones y en la sección B.1 del Anexo se presentan tablas con las diferentes variaciones para cada escenario y tipo de textura.

## 5.4.2. Gravedad Inclinada (GI)

En la Figura 5.3 se presenta el esquema utilizado para este caso. Como su nombre lo dice, este modelo considera la gravedad inclinada tratando de simular la pendiente que tiene el perfil hidrogeológico (ver Figura A.4, presentada en la sección A del Anexo). El ángulo  $\theta$  se obtiene a partir de las elevaciones y longitudes del perfil, con esto se descompone el vector de gravedad y se modela con dos vectores de gravedad en eje horizontal y vertical en función del ángulo  $\theta$ . Al igual que el caso anterior, el aporte hídrico del glaciar entra perpendicular a la superficie del lecho.

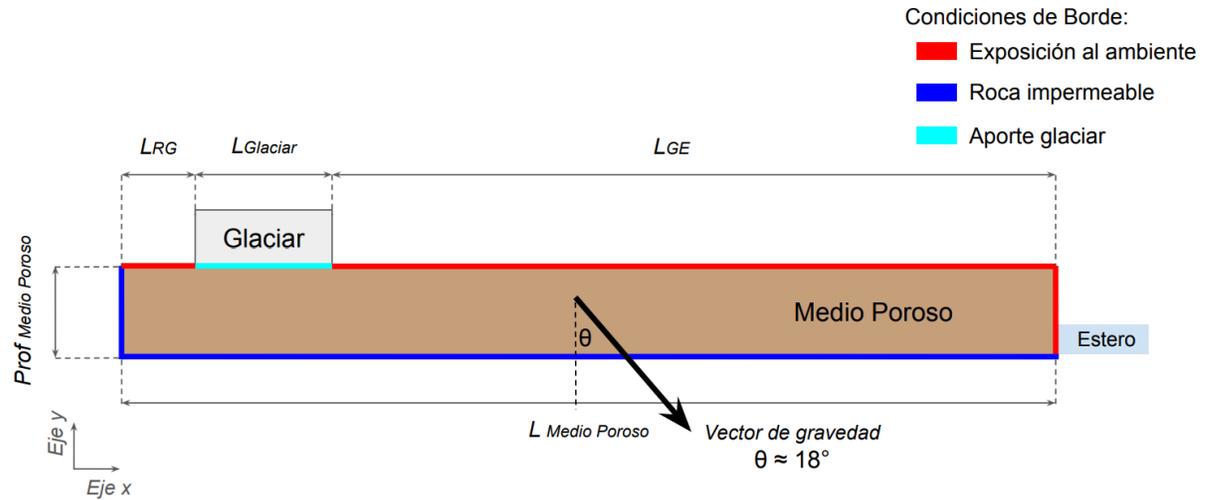


Figura 5.3: Esquema del modelo conceptual del caso de gravedad inclinada.

En este caso, solo se considera el Escenario 2 y se analizan las simulaciones al variar la profundidad del lecho para los dos tipos del lecho.

## 5.5. Determinación del tiempo de llegada del compuesto

Con el objetivo de comprender el comportamiento del trazador a lo largo del lecho poroso, se contempla el estudio de los tiempos de trasportes y las velocidades del compuesto conservativo. Se identificaron distintas zonas a lo largo del lecho poroso, siendo estas zonas específicas para cada tipo de variación analizada. En la Figura 5.4, se presentan las ubicaciones de estas zonas en el lecho poroso. En la sección B.2 del Anexo se muestran estas figuras con mayor detalle, junto con los valores asociados a las zonas para las distintas variaciones.

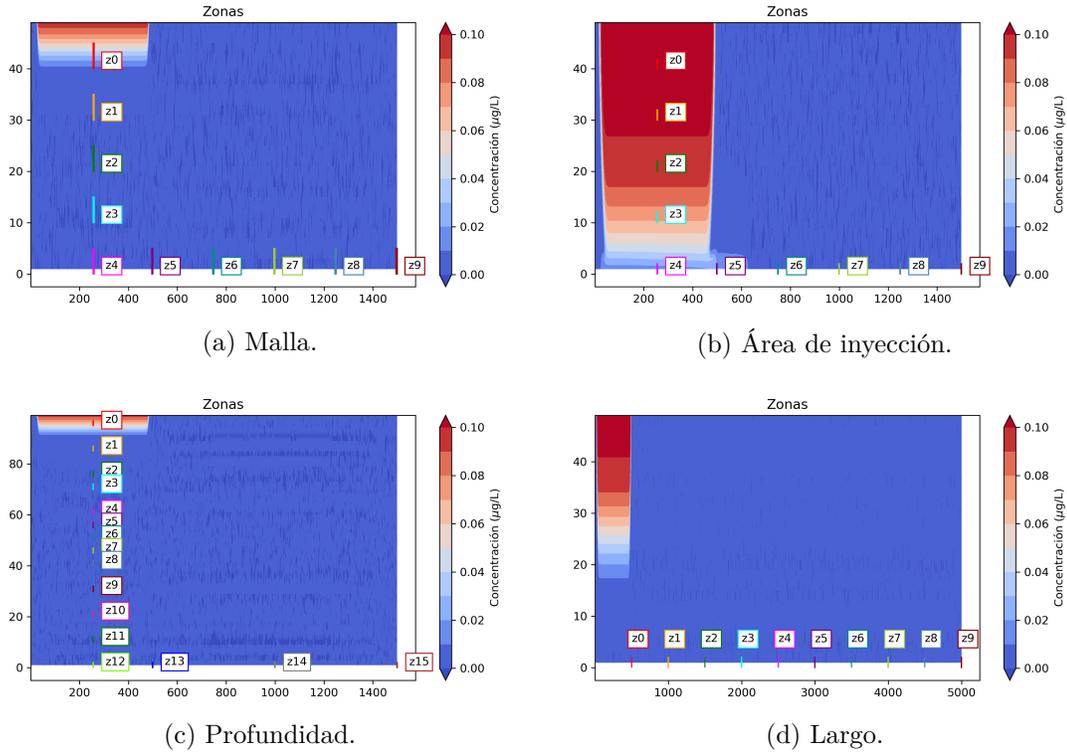


Figura 5.4: Zonas consideradas a lo largo del lecho poroso para las distintas variaciones.

Para determinar los tiempos, se toman en cuenta los intervalos en los que el trazador tarda en alcanzar alguna de estas zonas. Este tiempo se calcula mediante la ponderación de los tiempos correspondientes para las distintas celdas de la malla que se encuentran en esa zona. El tiempo de transporte del trazador desde la zona del glaciar hasta el estero se estima a partir del tiempo obtenido en la última zona de cada variación. En el caso de las variaciones en la malla, el área de inyección y el largo, la zona correspondiente al estero es  $z9$ , mientras que al variar la profundidad, la zona del estero es  $z15$ . Cabe destacar que los tiempos se estiman a través de las concentraciones del trazador en la zona, y se considera que el trazador se encuentra en la zona cuando la concentración de este es mayor a la concentración inicial.

En el caso de las velocidades, se estiman a partir de la diferencia de tiempo de transporte entre cada par de zonas, como por ejemplo, entre la zona  $z1$  y la zona  $z2$ . La velocidad se obtiene dividiendo la distancia entre ambas zonas por la diferencia de tiempo.

# Capítulo 6

## RESULTADOS Y ANÁLISIS

A continuación se presentan los resultados de los escenarios simulados obtenidos a partir de implementar el modelo en el software DuMu<sup>x</sup>. Primero, se muestran los resultados del análisis para escoger la malla a utilizar en las distintas simulaciones. Luego, se presentan los tiempos y velocidades obtenidas en el Caso Base, los resultados al variar el área de inyección, la profundidad y el largo del lecho, y, por último, la comparación entre los resultados al utilizar el caso de Gravedad No Inclinada (GNI) y Gravedad Inclinada (GI).

### 6.1. Selección de la discretización de la malla

Para seleccionar que malla utilizar en las diversas simulaciones del modelo, se decidió estimar los tiempos de transporte del trazador desde el glaciar hasta el estero, al variar la cantidad de celdas que posee la malla para diferentes escenarios.

En la Figura 6.1, se muestran los tiempos de transporte del trazador desde la zona glaciar hasta el estero.

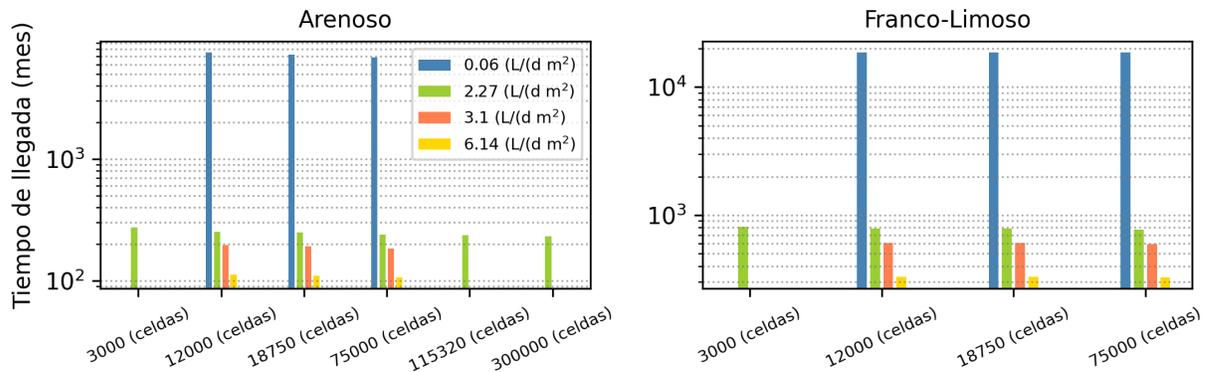


Figura 6.1: Tiempos de transporte del trazador al estero al variar la cantidad de celdas en la malla.

A partir de estos tiempos, se decidió calcular los errores relativos de los tiempos al variar entre mallas más finas. Este error se estimó a partir de la Ecuación (C.1) presentada en la sección C.3 del Anexo. En las Tablas 6.1 y 6.2, se detallan los errores entre los tiempos de llegada entre una malla y una malla más fina. Las mallas están denominadas del tipo (i j),

esto significa que la malla posee  $i \cdot j$  celdas. Por ejemplo, en el caso de la malla (750 25), esta posee 18750 celdas ( $750 \cdot 25 = 18750$ ). En donde se realiza el cálculo del error entre la  $Malla_i$ , malla más gruesa y con menor cantidad de celdas, y la  $Malla_{i+1}$ , malla más fina y con mayor cantidad de celdas.

Tabla 6.1: Error relativo entre los tiempos de llegada al estero entre una malla $_i$  y una malla $_{i+1}$  más fina para un medio poroso con textura arenosa.

Malla $_i$ -Malla $_{i+1}$	Error relativo [%]			
	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4
(300 10)-(600 20)		8,17 %		
(600-20)-(750 25)	3,58 %	1,60 %	1,69 %	1,80 %
(750 25)-(1500 50)	5,27 %	4,32 %	4,07 %	3,59 %
(1500 50)-(1860 62)		0,95 %		
(1860 62)-(3000 100)		1,58 %		

Tabla 6.2: Error relativo entre los tiempos de llegada al estero entre una malla $_i$  y una malla $_{i+1}$  más fina para un medio poroso con textura franco-limosa.

Malla $_i$ -Malla $_{i+1}$	Error relativo [%]			
	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4
(300 10)-(600 20)		2,50 %		
(600-20)-(750 25)	0,00 %	0,63 %	0,49 %	0,30 %
(750 25)-(1500 50)	0,19 %	1,99 %	1,42 %	1,17 %

Se consideró que una malla sería adecuada si presentaba un error relativo menor al 2%. Al considerar una textura franco-limosa, se observa que sus errores relativos son inferiores al 2%. Por lo tanto, las mallas con textura franco-limosa podrían utilizarse como el Caso Base. En el caso de la textura arenosa, se observan errores que varían entre el 0,95% y el 8,17%. Por lo tanto, no es posible determinar con exactitud que malla debería considerarse.

Se decidió utilizar una malla con 18750 celdas tanto para la textura arenosa como para la franco-limosa. Esta elección se basó en el hecho de que el tiempo de ejecución al utilizar una malla más fina en la textura arenosa se demoraba entre 15 a 24 horas más que el tiempo requerido para ejecutar la malla más gruesa. Además, un error de 5% en los tiempos obtenidos, periodos que abarcan desde decenas hasta centenas de años, se considera aceptable. Considerar una malla más fina afectaría los plazos del trabajo de título y sus objetivos. Cabe destacar que, idealmente, la elección de la malla debería implicar errores relativos mínimos en los tiempos de llegada del trazador y que, al comparar velocidades del compuesto entre las distintas mallas, estas se comporten de manera similar.

Adicionalmente, se llevó a cabo un análisis para determinar el tipo de regresión que mejor describe los tiempos obtenidos en relación con la cantidad de celdas que posee la malla. Con el objetivo de conocer si existe una relación entre la variación de estas cantidades de celdas y los tiempos. En la Figura 6.2, se presentan los tiempos de llegada en función de

la cantidad de celdas. Ambas variables se encuentran en escala logarítmica, junto con sus respectivas regresiones potenciales de la forma  $\text{Tiempo} = a \cdot \text{Cantidad de celdas}^b$ , donde  $a = f(\text{textura, aporte hídrico})$  y  $b = g(\text{textura, aporte hídrico})$ . En la Figura 6.3, se presentan los valores de los coeficientes  $a$  y  $b$ .

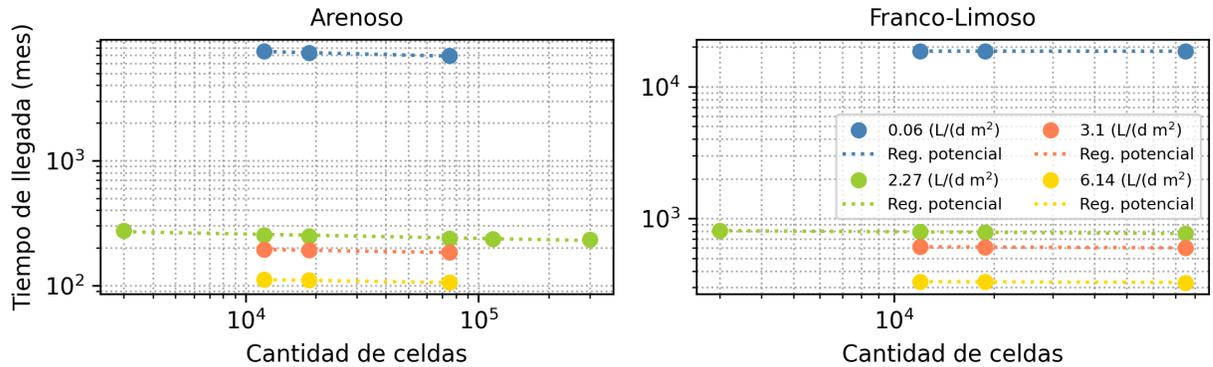


Figura 6.2: Tiempos de transporte del trazador al estero al variar la cantidad de celdas en la malla en escala logarítmica. Las líneas punteadas son las regresiones potenciales de cada caso y los puntos son los tiempos obtenidos.

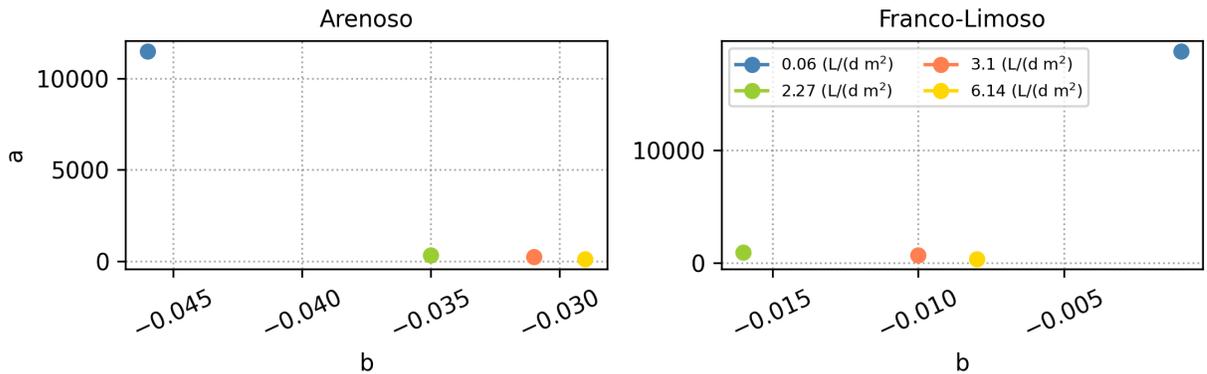


Figura 6.3: Valores de los coeficientes  $a$  y  $b$  de las regresiones potenciales ( $\text{Tiempo} = a \cdot \text{Cantidad de celdas}^b$ ).

A partir de lo anterior, se puede inferir que existe una relación logarítmica entre estas dos variables para cualquier aporte hídrico, dado que las regresiones en escala logarítmica son rectas. Además, se observa que las pendientes de las regresiones son ligeramente negativas, lo que indica que el tiempo depende de la cantidad de celdas y que esta relación logarítmica es decreciente. En otras palabras, hay una disminución proporcional del tiempo con respecto a la cantidad de celdas. Sin embargo, dado que las pendientes son muy cercanas a cero, se puede inferir que el cambio que produce la cantidad de celdas en el tiempo es leve.

Además, para verificar la idoneidad de la malla, es necesario asegurarse de que la velocidad obtenida de la malla con 18750 celdas se comporte de manera similar a las velocidades

obtenidas con las demás mallas. En las Figuras 6.4 y 6.5, se presentan las velocidades en función del recorrido perpendicular y paralelo al fondo, respectivamente.

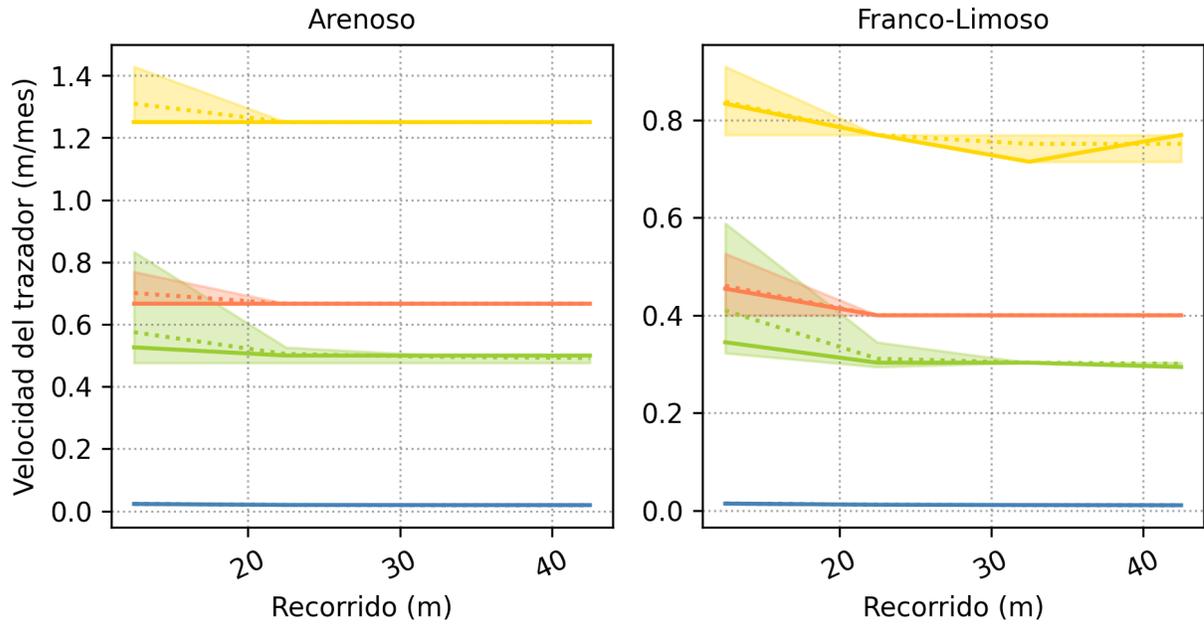


Figura 6.4: Velocidades del trazador en función del recorrido perpendicular al fondo al variar la cantidad de celdas en la malla según el aporte hídrico y textura del lecho.

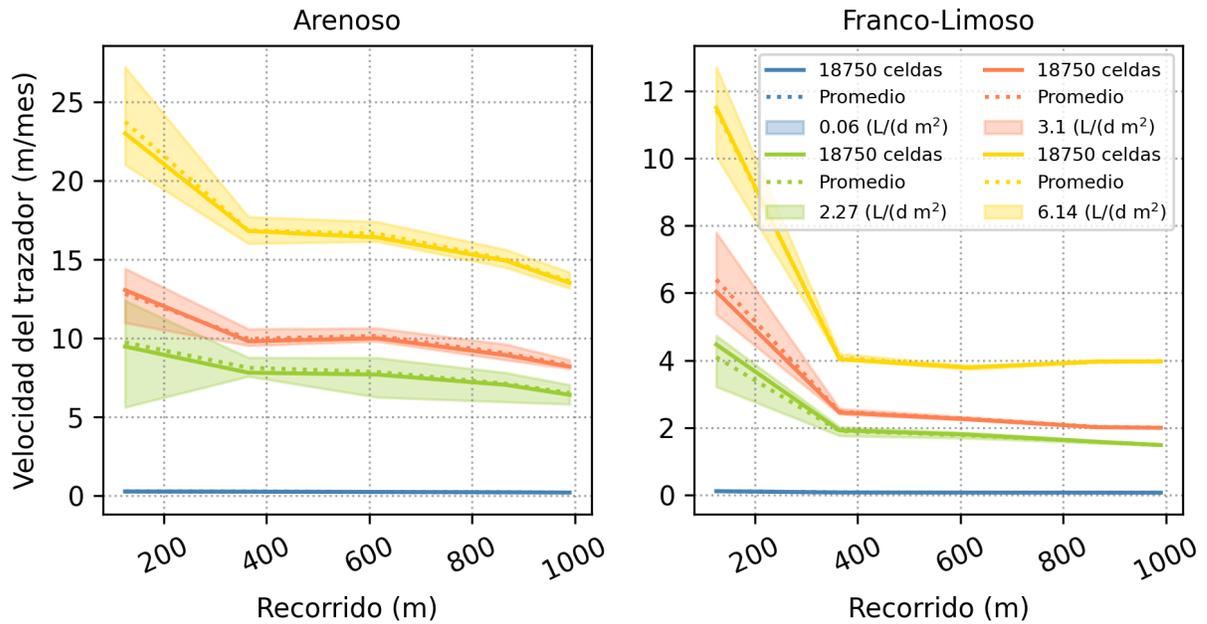


Figura 6.5: Velocidades del trazador en función del recorrido paralelo al fondo al variar la cantidad de celdas en la malla según el aporte hídrico y textura del lecho.

En estas figuras, se presentan las velocidades medias, mínimas y máximas, así como la obtenida al utilizar una malla con 18750 celdas. En la Figura 6.4, se observa que las velocidades al inicio del recorrido, al utilizar la malla de 18750 celdas, las velocidades se sitúan por debajo del promedio en la textura arenosa. Por otro lado, para la textura franco-limosa, se nota que esta velocidad a lo largo del recorrido es similar al promedio, a excepción de considerar un aporte hídrico alto.

La Figura 6.5, se observa que tanto para la textura arenosa como la franco-limosa, la velocidad obtenida con la malla de 18750 celdas es similar al promedio de las velocidades obtenidas con las otras mallas.

Por lo tanto, la malla seleccionada para llevar a cabo las demás simulaciones consta de 18750 celdas, cada una con un tamaño de 2 m x 2 m ( $\Delta x = \Delta y = 2$  m).

## 6.2. Tiempo y velocidades en el Caso Base

Como se mencionó en el Capítulo 5, se conocen las características que describen el Caso Base. Estas características representa las propiedades y dimensiones que se encuentran en la zona de estudio, esto se ve reflejado en los valores considerados en el área del aporte hídrico, zona donde se encuentra el glaciar Paloma Este, el largo y la profundidad del lecho. En el caso del valor de la cantidad de celdas en la malla (18750 celdas) es escogido debido al tiempo de ejecución en el programa y los resultados son adecuados para ese rango de tiempo de ejecución.

Además, cabe destacar que inicialmente este Caso Base es simulado con un vector de gravedad sin inclinación, llamado caso de Gravedad No Inclinada (GNI), y se obtuvieron diferentes tipos tiempo de transporte y comportamiento del trazador a lo largo del lecho poroso arenoso y franco-limoso, respectivamente. En las Figuras 6.6 y 6.7 se muestran el paso del trazador en el lecho. En el caso de la Figura 6.6 se observa el transporte del trazador a través de un lecho poroso arenoso, mientras que la Figura 6.7 es a través de un lecho poroso franco-limoso.

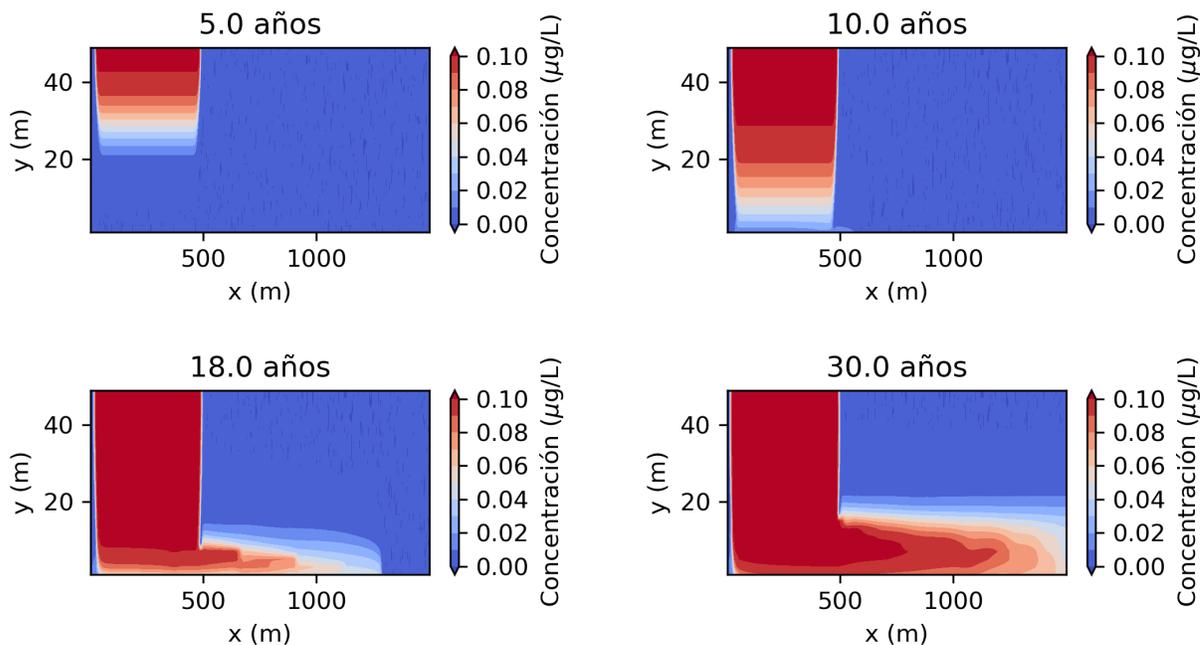


Figura 6.6: Concentración del trazador en el lecho poroso con textura arenosa en el Escenario 2. Se visualiza el Caso Base.

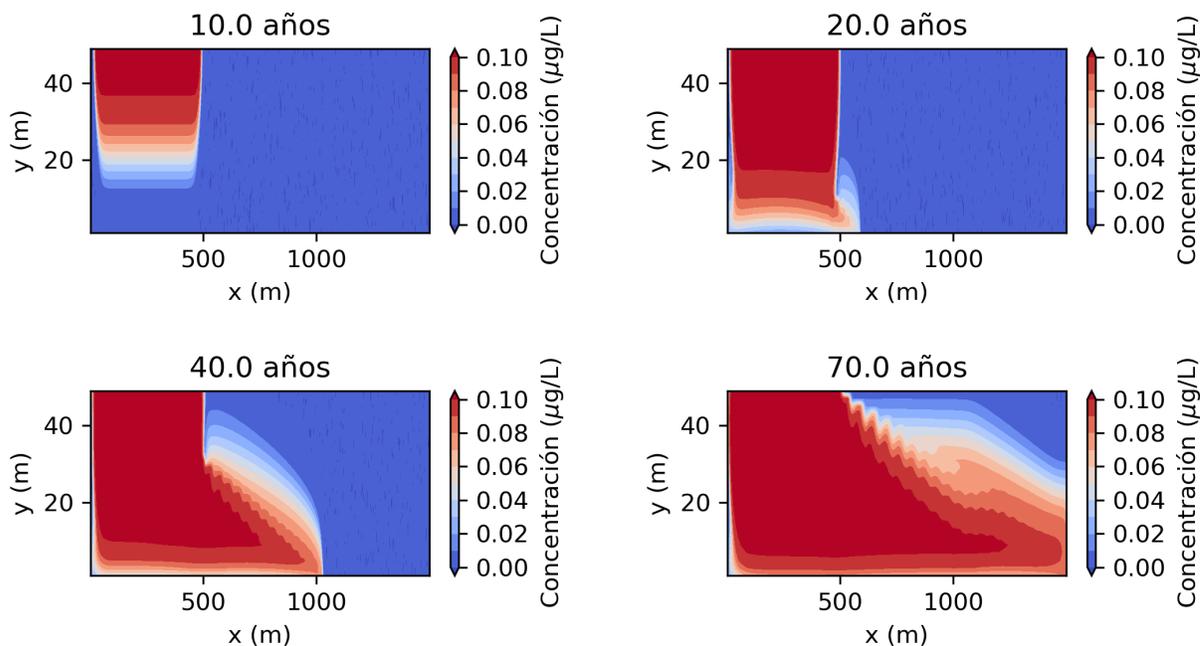


Figura 6.7: Concentración del trazador en el lecho poroso con textura arenosa en el Escenario 2. Se visualiza el Caso Base.

A partir de estas figuras, se ejemplifica el comportamiento del trazador a lo largo del tiempo y a través del lecho poroso. Donde arriba de cada panel se indica el tiempo que ha transcurrido el trazador desde su ingreso al lecho (condición inicial). Además, se identifican las zonas del lecho en las cuales hay presencia del trazador. El color rojo indica la presencia de este, mientras que en color azul indica la nula concentración de este.

Tanto en la Figura 6.6 y 6.7, se aprecia el comportamiento del trazador con dos movimientos: un transporte del trazador desde la zona glaciaria al fondo del lecho, donde este movimiento es perpendicular al fondo del lecho, y un transporte desde que el trazador entra en contacto con el fondo hasta el estero, con un movimiento paralelo al fondo.

Entre un lecho arenoso, con textura gruesa, y un lecho franco-limoso, con textura fina, se observa que el transporte del trazador desde la zona de aporte hídrico hasta el fondo del lecho es similar. Sin embargo, este comportamiento del trazador cambia entre estos tipos de lechos cuando este entra en contacto con el fondo del lecho. Por ejemplo, en la Figura 6.7 se nota que en el momento en que el trazador comienza a interactuar con el fondo del lecho, se desplaza a lo largo de este y hacia arriba. En cambio, al considerar un lecho arenoso (ver Figura 6.6) se observa que este se desplaza a lo largo del fondo y no se distribuye hacia arriba.

Cabe destacar, que a través de estas simulaciones y figuras, se puede concluir que el tiempo de transporte del trazador a lo largo del lecho poroso arenoso es menor que al considerar un lecho poroso franco-limoso.

Además, a partir de estas figuras, se observa que el trazador al interactuar con el fondo, que corresponde a la condición de borde impermeable (ver Capítulo 5), provoca ondas o fluctuaciones de concentraciones en el espacio. Se observa que estas ondas son distintas al considerar distintos tipos de texturas. Estas ondas se pueden ver atribuidas a inestabilidades numéricas relacionadas con la condición impermeable. Otro aspecto importante a destacar, es la similitud entre la onda de concentraciones generadas en las simulaciones y la onda de densidad de corriente.

La Figura 6.8 se muestran los distintos tiempos de llegada obtenidos al variar el aporte hídrico que ingresa al lecho y al variar la textura del lecho. Las barras azules son los tiempos para un lecho arenoso, mientras que las barras rojas son para un lecho franco-limoso. Los valores de los aportes hídricos se encuentran en la Tabla 5.3 y se muestran en que tipo de escenario se encuentra.

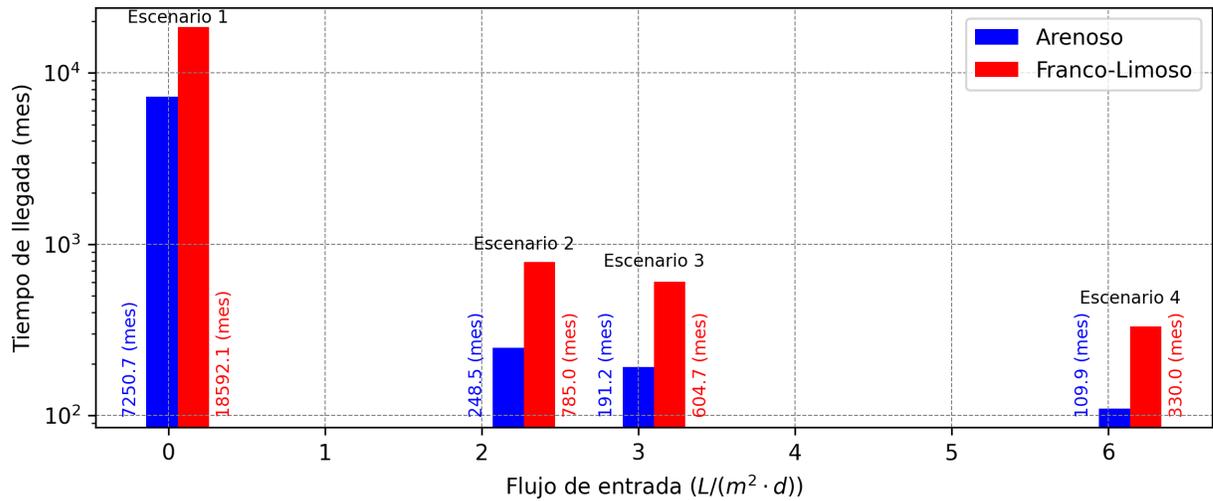


Figura 6.8: Tiempo de transporte del trazador desde el glaciar hacia el estero en función del aporte hídrico para el Caso Base.

Para el Escenario 1 se obtienen tiempos de llegada de 604,2 y 1549,3 años para los lechos de textura arenosa y franco-limosa, respectivamente. En el caso del Escenario 2 se tiene un tiempo en el lecho arenoso de 20,7 años y en el lecho franco-limoso de 65,4 años. En el Escenario 3, el lecho arenoso se demora 15,9 años, mientras que para el lecho franco-limoso se demora 50,4 años. El último escenario se demora 9,2 y 36,7 años con una textura arenosa y franco-limoso, respectivamente.

Se observa que, al de aumentar el aporte hídrico, el tiempo de transporte disminuye. Además, se muestra que al considerar un lecho poroso con textura gruesa, arenoso, el tiempo es menor que al considerar un lecho con textura más fina, franco-limoso.

Con el objetivo de comparar las diferencias entre los tiempos y sus texturas, se determinó realizar una regresión potencial de la forma  $Tiempo = a \cdot Textura^b$ . En la Figura 6.9, se presentan los tiempos en función de los aportes hídricos en escala logarítmica con sus respectivas regresiones potenciales. Además, en la Tabla 6.3 se presentan los valores de los coeficientes  $a$  y  $b$  para un tipo de textura arenoso y franco-limoso.

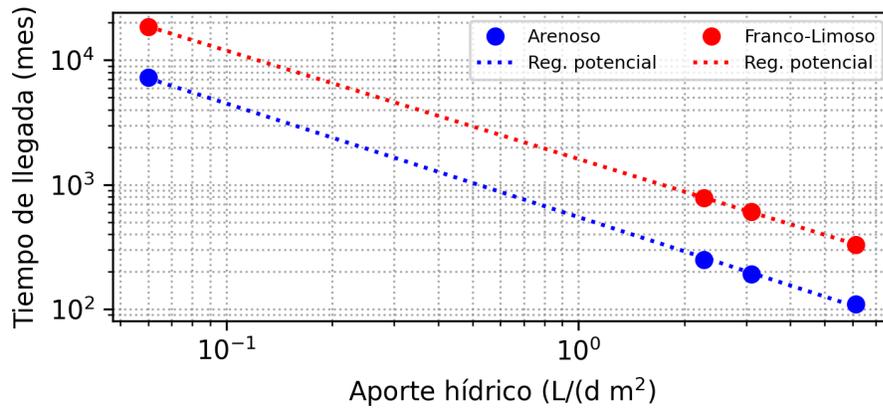


Figura 6.9: Tiempo de transporte del trazador desde el glaciar hacia el estero en función del aporte hídrico para el Caso Base.

Tabla 6.3: Regresión potencial del tiempo de llegada del trazador al estero en función de la textura del lecho poroso para el Caso Base (Tiempo =  $a \cdot \text{Textura}^b$ ).

	Textura del medio poroso	
	Arenosa	Franco-Limoso
a	4571,6	12755
b	-2,989	-2,866

A partir de estos resultados, se observa que existe una relación inversa entre el aporte hídrico y el tiempo de llegada. A medida que el aporte hídrico aumenta, el tiempo de llegada del trazador al estero disminuye. Dado que el coeficiente  $a$  es mayor en el caso de considerar una textura franco-limoso, esto indica que dicha textura ejerce un efecto más fuerte en el tiempo en comparación con una textura arenosa. La regresión del lecho arenoso posee un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) de 0,993, mientras que el lecho franco-limoso posee un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) igual a 0,992.

Las velocidades del Caso Base se presentan en las Figuras 6.4 y 6.5 como líneas continuas. Se observa que las velocidades son menores al considerar una textura franco-limoso y aumentan con un mayor aporte hídrico. También se nota que al inicio del recorrido, tanto en dirección vertical como horizontal, las velocidades son más altas. Además, las velocidades alcanzan valores superiores cuando el trazador se desplaza horizontalmente o se encuentra paralelo al fondo del lecho.

En la sección C.1.1 del Anexo se presentan las concentraciones del compuesto conservativo a través del lecho para los distintos escenarios y texturas de lechos. En ellos se muestra la concentración del trazador en 4 tiempos del escenario al igual que las Figuras 6.6 y 6.7.

### 6.3. Variaciones de parámetros

Como se mencionó en el Capítulo 5, se variaron tres parámetros en función al Caso Base: el área de inyección del aporte hídrico, la profundidad y el largo del lecho.

La Figura 6.10 se representa los tiempos de transporte desde la zona glaciario hasta el estero en función de la variación para los distintos escenarios en un lecho arenoso y franco-limoso. Estos tiempos fueron estimados a partir de lo mencionado en la Sección 5.5. En esta figura se muestran las razones entre dos tiempos: el tiempo de llegada al estero de cierta variación  $i$  ( $t_i$ ) entre el tiempo del Caso Base ( $t_{base}$ ). En la sección C.1.2 del Anexo se encuentran las imágenes con mayor detalle y en la sección C.1.3 del Anexo se encuentran figuras con los valores obtenidos en los tiempos de transporte del trazador al estero. En la Tabla 6.4 se encuentran los tiempos de llegada utilizados como  $t_{base}$  para los lechos arenoso y franco-limoso según su escenario.

Tabla 6.4: Tiempo de llegada del trazador al estero con textura arenosa y franco-limoso para el Caso Base.

	$t_{base}$ (mes)	
	Arenoso	Franco-Limoso
Escenario 1	7262,67	18628,12
Escenario 2	248,55	786,05
Escenario 3	191,72	605,72
Escenario 4	110,72	330,05

Con el objetivo de analizar las relaciones entre los tiempos obtenidos y las distintas variaciones, se realizó una regresión potencial de la forma  $\text{Tiempo} = a \cdot \text{Variación}^b$ . A partir de este análisis, se presenta la Figura 6.11, que muestra las diferentes regresiones potenciales en gráficos de tiempo de llegada en función de las variaciones, representadas en escala logarítmica.

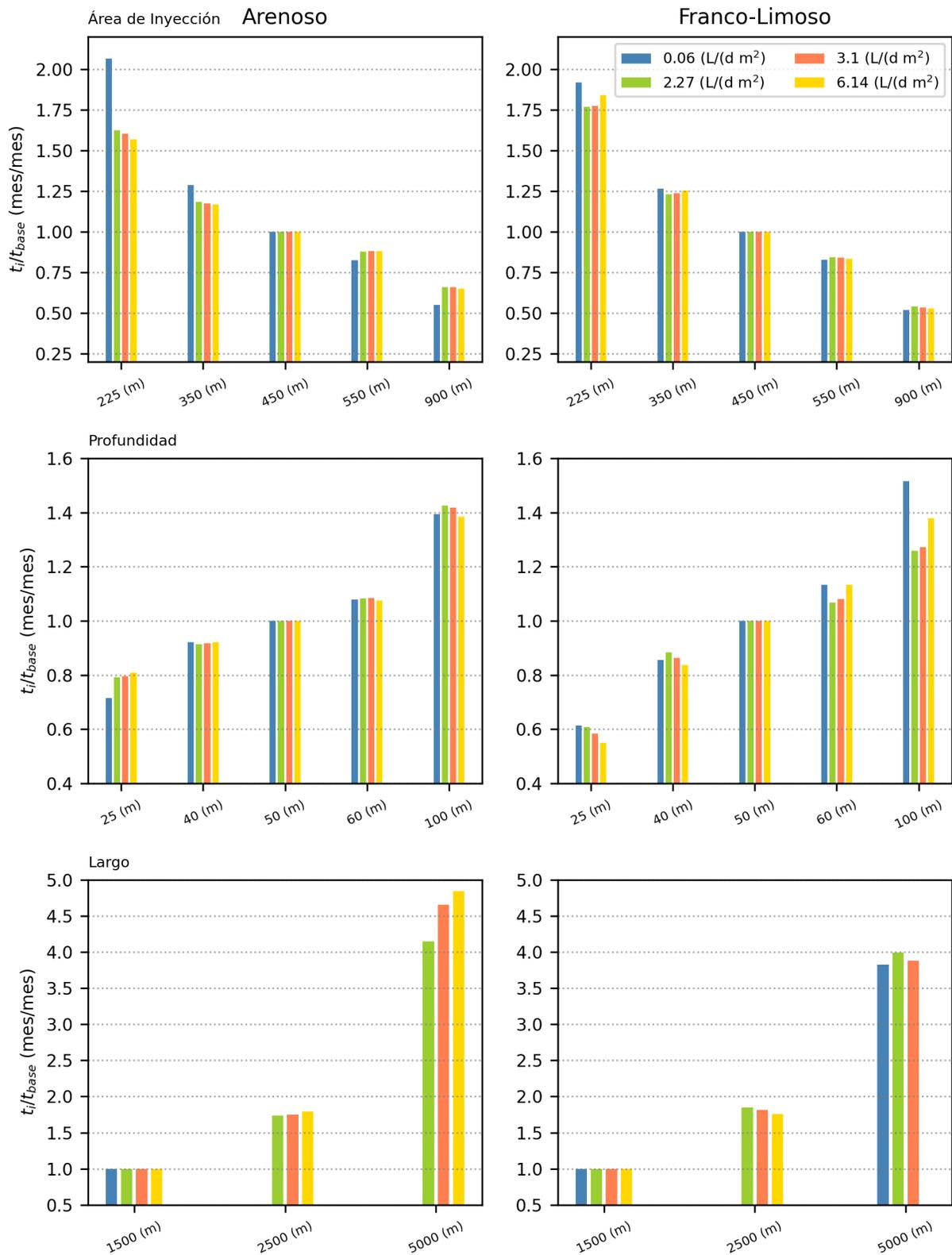


Figura 6.10: Razón entre los tiempos de transporte del trazador al estero al variar la cantidad de celdas en la malla, el área de inyección del aporte hídrico, la profundidad y el largo del lecho poroso ( $t_i$ ) y los tiempos de transporte obtenidos del Caso Base ( $t_{base}$ ).

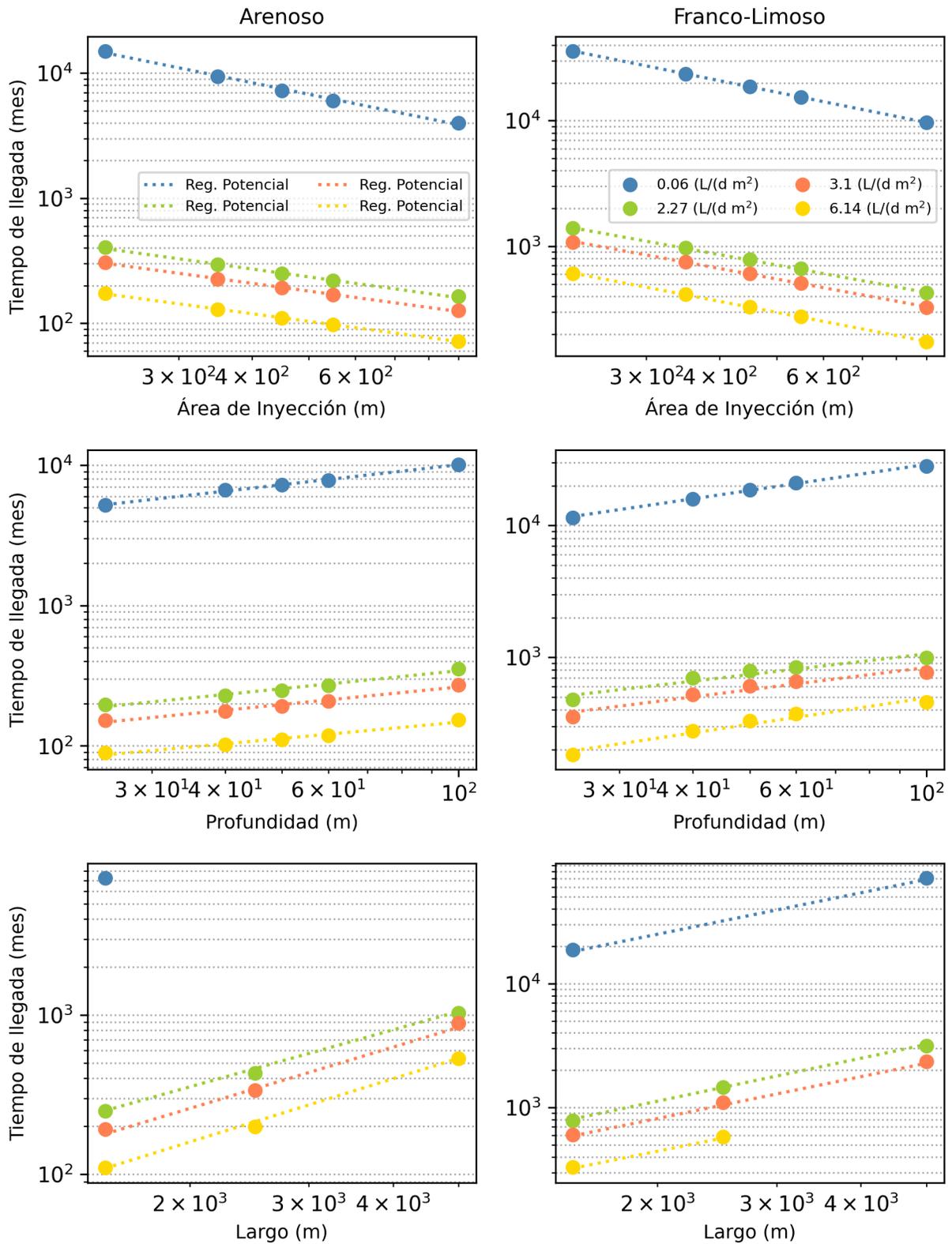


Figura 6.11: Tiempo de llegada del trazador en función de las distintas variaciones junto a sus regresiones potenciales, su aporte hídrico y tipo de textura en el lecho.

Considerando las Figuras 6.10 y 6.11, se obtuvieron las siguientes observaciones con respecto a los tiempos de transporte del trazador desde la zona del glaciar al estero:

- **Variación del área de inyección (ver Figura 6.10, Panel Área de Inyección):**
  - A medida que el área del aporte hídrico aumenta, el tiempo de llegada al estero disminuye.
  - La textura franco-limosa posee un impacto mayor en los tiempos al variar el área en comparación con una textura arenosa.
  - Se observa que la diferencia en los tiempos de los aportes hídricos de 2,27; 3,1 y 6,14 L/(m<sup>2</sup> d) se comporta de manera similar.
  - Existe una relación logarítmica entre el tiempo y el área de inyección del aporte hídrico, esta relación es inversamente proporcional y considerable.
  - Se observa que al aumentar el aporte hídrico, el tiempo se ve afectado por esta variable.
  - El área de inyección posee un impacto significativo en el tiempo.
  
- **Variación de la profundidad (ver Figura 6.10, Panel Profundidad):**
  - Al aumentar la profundidad del lecho, el tiempo de transporte del trazador aumenta.
  - Comparando ambas texturas, se observa que las diferencias entre el tiempo del Caso Base con los tiempos de las otras variaciones es mayor cuando nos encontramos en una textura franco-limosa.
  - Se nota que al cambiar la profundidad entre los diferentes aportes hídricos, la diferencia entre ellos es más pronunciada al considerar un lecho franco-limoso que uno arenoso.
  - Con respecto al aporte hídrico considerado, el Escenario 1 (0,06 L/(m<sup>2</sup> d)) presenta mayores tiempos que los otros escenarios y que al considerar un aumento en la profundidad este posee una gran diferencia entre los demás escenarios y con tiempos elevados en una textura franco-limosa.
  - Existe una relación logarítmica entre el tiempo y la profundidad del lecho. Esta relación es directamente proporcional.
  - La profundidad posee un impacto en el tiempo de transporte del trazador.
  
- **Variación del largo (ver Figura 6.10, Panel Largo):**
  - Los escenarios 2 y 3 (2,27 L/(m<sup>2</sup> d) y 3,10 L/(m<sup>2</sup> d)) son los únicos que cuentan con simulaciones en todas las variaciones del largo del lecho.
  - Cuando se tiene en cuenta una longitud en el lecho poroso mayor, se observa un aumento en los tiempos de transporte del trazador hacia el estero.
  - Al aumentar la longitud de 1500 m a 5000 m, los tiempos se cuadruplican con respecto a los obtenidos en el Caso Base, ya sea para la textura franco-limosa o para la arenosa.
  - Con respecto a la relación entre escenarios y aporte hídrico, esta no se presenta de manera clara.

- En el lecho arenoso, se observa que a medida que se incrementa la longitud del lecho, la disparidad entre los tiempos de los diferentes escenarios se amplía.
- En el caso de los escenarios 2 y 3, se observa una relación logarítmica entre el tiempo y el largo del lecho. Con respecto a los demás escenarios, es difícil inferir que se posee esta relación por falta de resultados.
- El largo posee un impacto significativo positivo en el tiempo de transporte del trazador. Si el largo aumenta, el tiempo también.

Asimismo, al comparar las diferentes variaciones, se nota que aquellas que tienen un impacto significativo son el área de inyección y largo. Esto debido a lo presentado en la Figura 6.11, donde se observa pendientes más pronunciadas en estos casos. En conclusión, a medida que la distancia que recorre el trazador disminuye, los tiempos de llegada al estero también, este patrón se aplica tanto para la variación de profundidad, largo y área de inyección.

En la Figura 6.12 se presentan los valores de los coeficientes de  $a$  y  $b$  de la regresión potencial de los tiempos en función de la variación ( $\text{Tiempo} = a \cdot \text{Variación}^b$ ). Por ejemplo, en el caso de la variación de la profundidad se consideró la regresión de la forma  $\text{Tiempo} = a \cdot \text{Profundidad}^b$ .

A partir de estas regresiones potenciales y observando los valores del coeficiente  $a$ , se puede inferir que el Escenario 1, aporte hídrico igual a  $0,06 \text{ L}/(\text{m}^2 \text{ d})$ , podría tener un impacto más significativo en el tiempo que los demás escenarios. Además, se nota que el área de inyección del aporte hídrico también podría tener un impacto más fuerte en el tiempo en comparación con las otras variaciones.

Observando el coeficiente  $b$ , se deduce que tanto el largo como la profundidad poseen una relación directa con el tiempo. Quiere decir, que a medida se considera un largo o una profundidad mayor, mayor distancia recorrida por el trazador, el tiempo es mayor. Mientras que al variar el área de inyección, esta muestra una relación inversamente proporcional con respecto al tiempo.

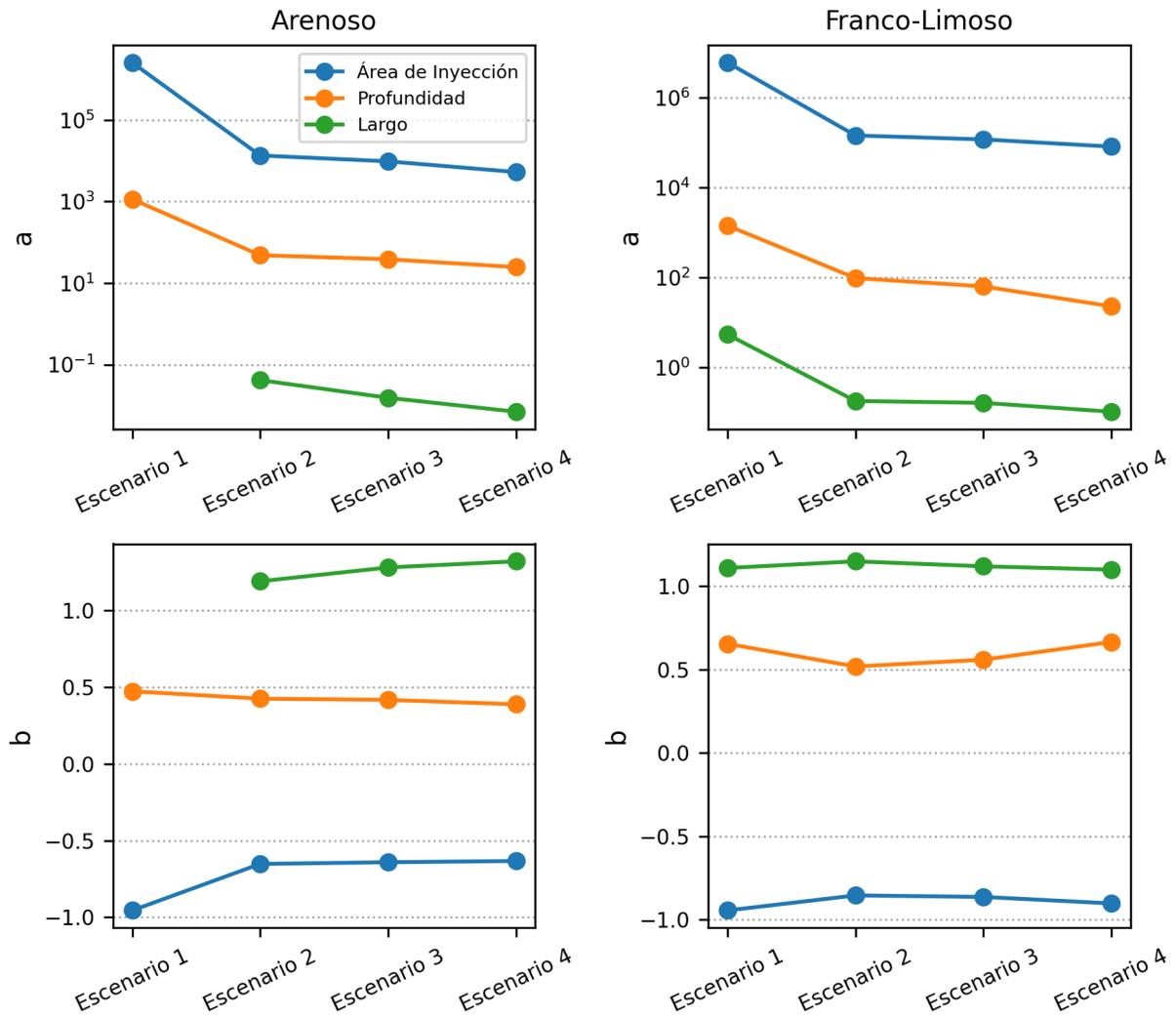


Figura 6.12: Valores de los coeficientes  $a$  y  $b$  de la regresión potencial  $\text{Tiempo} = a \cdot \text{Variación}^b$  en función de los escenarios.

Con respecto a la variación del área de inyección, la idea principal de este análisis es comprender los tiempos que el trazador tarda en llegar al estero en el pasado. Por ejemplo, en el caso de las áreas de inyección más grandes, estas representan el aporte hídrico que existía anteriormente. Según el informe de Rivera et al. (2011), se describen las variaciones areales de glaciares de distintas zonas del país. En el caso del glaciar La Paloma, se informa que posee una variación de  $-12\%$  en el periodo de 1989-2007 (18 años). Considerando esta variación y que el área actual del glaciar es igual a 450 m, significa que las áreas de 550 y 900 m representan condiciones de 27,28 y 75 años atrás de la fecha actual, respectivamente. Mientras que las áreas de 350 y 225 m representan condiciones de 33,34 y 75 años después de la fecha actual, respectivamente. Cabe recordar lo mencionado en el Capítulo 5, que el área de inyección no posee unidades de  $L^2$ , debido a que es un área unidimensional. Por lo que se considera como área el largo del glaciar, dado que el ancho se considera igual a uno para forzar la unidimensionalidad.

Además de obtener y analizar los tiempos de transporte del trazador desde el aporte hídri-

co hasta el estero, se decidió estudiar las velocidades de transporte de este compuesto. Para cada variación, se consideraron diferentes zonas debido a las variadas geometrías y mallas que pueden poseer entre ellas. Estos aspectos se detallan en el Capítulo 5.

Se estudiaron dos velocidades, las cuales dependen del movimiento que realiza el compuesto. Una velocidad se estima a partir de las zonas ubicadas perpendicularmente al fondo del lecho, con el fin de comprender el comportamiento del trazador entre el glaciar y el fondo del lecho. La segunda velocidad se estima a partir de las zonas ubicadas en paralelo al fondo, para conocer el comportamiento del compuesto desde el momento en que entra en contacto con el fondo del lecho hasta llegar al estero. En las Figuras 6.13 y 6.14 se presentan la primera y la segunda velocidad, respectivamente. En la Figura 6.13 se presenta la solución analítica de Vanderborgh et al. (2005), línea discontinua, que representa la velocidad obtenida al considerar una infiltración de agua con caudal constante en un suelo seco semi-infinito.

Considerando la Figura 6.13, se obtuvieron las siguientes observaciones con respecto a las velocidades en función del recorrido perpendicular al fondo del lecho:

- **Variación del área de inyección (ver Figura 6.13, Panel Área de Inyección):**
  - En una textura arenosa, no se observan grandes variaciones de velocidad a lo largo del recorrido, por lo que se mantiene constante a lo largo del recorrido.
  - En una textura franco-limosa, la velocidad al inicio del recorrido es mayor que las demás velocidades. Esta velocidad inicial es relativamente mayor que la velocidad que se mantiene a lo largo del recorrido.
  - Al considerar un aporte hídrico mayor, la velocidad aumenta.
  - Las velocidades son mayores al considerar una textura arenosa que una textura franco-limosa.
  - Las velocidades obtenidas son similares a las velocidades obtenidas con la solución analítica de Vanderborgh et al. (2005).
  
- **Variación de la profundidad (ver Figura 6.13, Panel Profundidad):**
  - Tanto para una textura arenosa como franco-limosa, se observan variaciones u ondas a lo largo del recorrido, las cuales cesan una vez alcanzada una profundidad de 80 m.
  - A partir de los 80 m de profundidad, la velocidad se mantiene constante y es similar a la velocidad obtenida con la solución analítica propuesta por Vanderborgh et al. (2005).
  - Con un mayor aporte hídrico, se obtiene una mayor velocidad y aumenta la variación a lo largo del recorrido.
  - Al inicio del recorrido, las velocidades son altas. Luego, el trazador desacelera y entra en fluctuaciones de velocidades.
  - Se infiere que a medida que la profundidad aumenta, la velocidad tiende a volverse constante y se asemeja a la solución analítica.

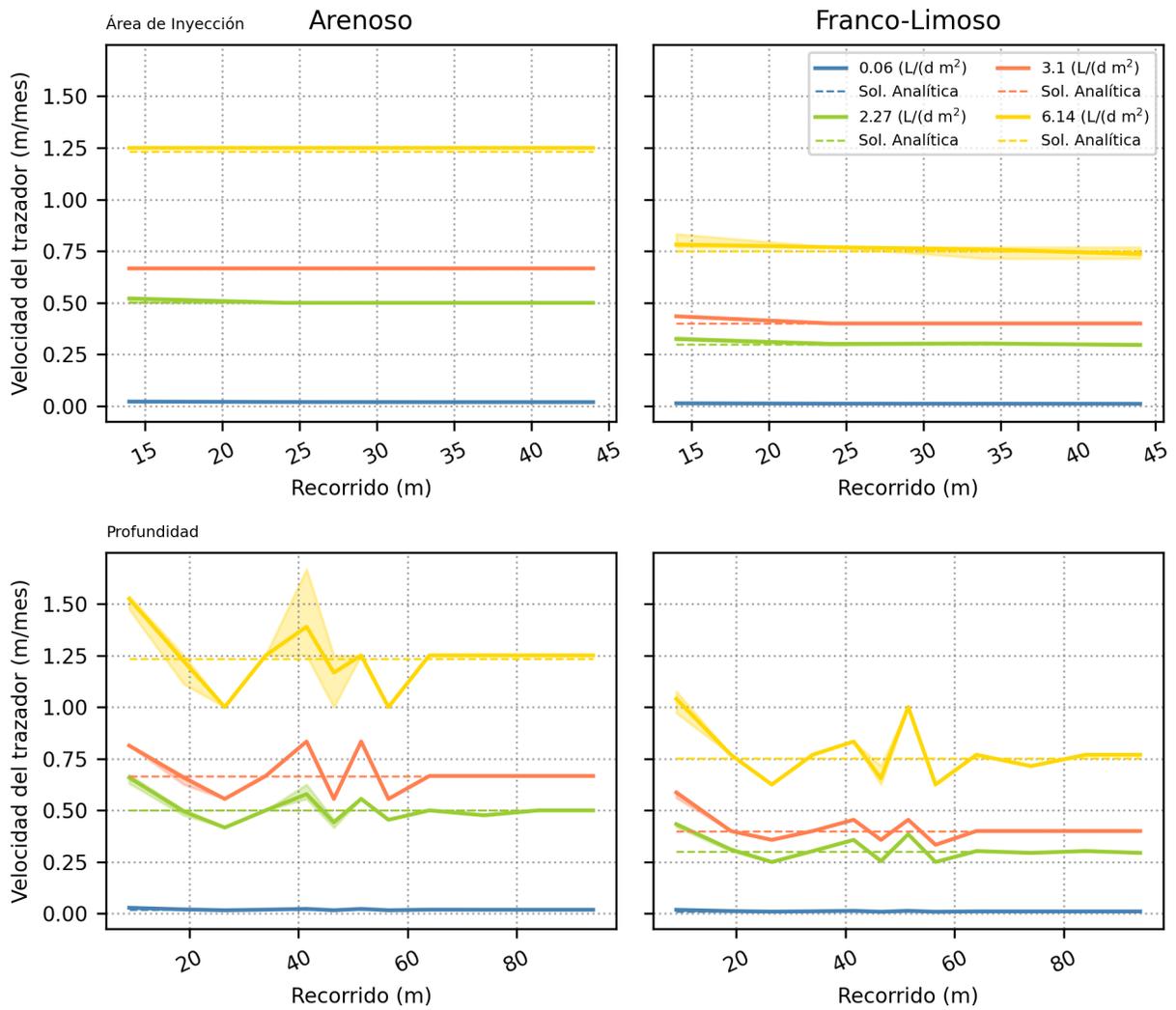


Figura 6.13: Velocidades del trazador en función del recorrido perpendicular al fondo para los distintos escenarios al variar el área de inyección del aporte hídrico, la profundidad y el largo del lecho con textura arenosa y franco-limoso según el aporte hídrico. En los paneles de la izquierda se encuentran las velocidades obtenidas con un lecho poroso arenoso, mientras en la derecha con un lecho poroso franco-limoso. Además, se observa la velocidad obtenida a partir de la solución analítica de Vanderborgh.

Considerando la Figura 6.14 y que el recorrido inicial es el punto en que el trazador entra en contacto con el fondo del lecho, se obtuvieron las siguientes observaciones:

- **Variación del área de inyección (ver Figura 6.14, Panel Área de Inyección):**
  - Se observa que al inicio del recorrido las velocidades son bajas y crecen hasta que el trazador recorre una distancia de aproximadamente 300 m.
  - Del recorrido 300 m en adelante se observa que la velocidad media se mantiene prácticamente constante.

- La velocidad entre el suelo arenoso y el franco-limoso es considerable, siendo la textura arenosa la que presenta mayores velocidades.
- Se destacan notables diferencias en este caso, con una clara separación entre los valores máximos, medios y mínimos. Esto quiere decir que entre las distintas variaciones de área de inyección las velocidades fueron variadas.
- En la textura franco-limosa, se observa que la velocidad se mantiene constante desde que el trazador ha recorrido 800 m hasta llegar al final del recorrido con una velocidad constante.

- **Variación del área de inyección (ver Figura 6.14, Panel Área de Inyección):**

- A lo largo de todo el recorrido se observa de la velocidad del trazador desciende.
- Se observa que hay dos pendientes de velocidad en función del recorrido. La pendiente más pronunciada indica que en esos tramos el trazador desacelera más rápido que el otro recorrido.
- Las velocidades obtenidas con una textura arenosa son el doble de las obtenidas con una textura franco-limosa.
- En la textura franco-limosa, se observa una mayor variación entre las distintas simulaciones con diferentes áreas de inyección.

- **Variación del largo (ver Figura 6.14, Panel Largo):**

- En una textura arenosa, se observa que la velocidad del trazador desciende a lo largo del recorrido hasta mantenerse constante.
- En el caso de considerar una textura franco-limosa, la velocidad se mantiene constante en gran parte del recorrido.
- Las velocidades en una textura franco-limosa son menores que una textura arenosa.

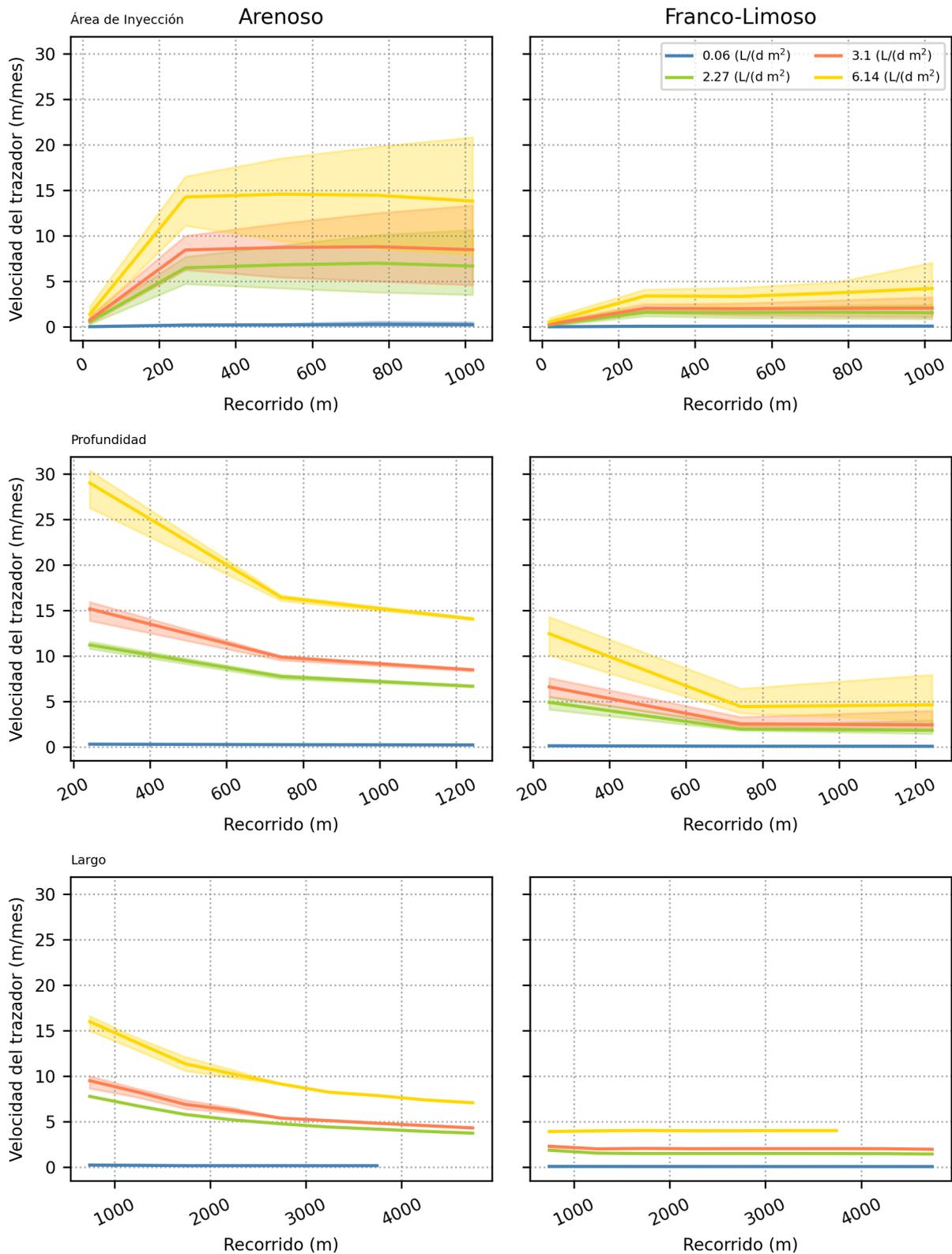


Figura 6.14: Velocidades del trazador en función del recorrido paralelo al fondo para los distintos escenarios al variar el área de inyección del aporte hídrico, la profundidad y el largo del lecho con textura arenosa y franco-limoso según el aporte hídrico.

Al comparar las velocidades en función del recorrido perpendicular y paralelo al fondo, se observa que las velocidades en el recorrido perpendicular al fondo (ver Figura 6.13) son inferiores que las velocidades obtenidas en el recorrido paralelo al fondo. Además, que estas velocidades son similares a las obtenidas con la solución analítica de Vanderborgh et al. (2005), mientras que las velocidades en función del recorrido paralelo al fondo no. Esto puede verse influenciado por la condición de borde que se presenta al fondo del lecho, específicamente la capa impermeable. Esta condición provoca un aumento en la velocidad del trazador una vez que este entra en contacto con el fondo.

Con respecto a las velocidades en función del recorrido paralelo al fondo, estas van disminuyendo a medida que el trazador recorre el lecho. Esta reducción de velocidad podría deberse a la resistencia que presenta el suelo prácticamente seco al movimiento del fluido. Aunque esta disminución de velocidad puede atribuirse a diversos factores, tanto las propiedades del medio poroso como las del flujo podrían estar influyendo.

Se observa que sin importar lo que se esté variando las velocidades son similares al final del recorrido, tanto al considerar una textura arenosa como franco-limoso. Esto último es válido para las velocidades obtenidas en función del recorrido perpendicular y paralelo al fondo.

En la sección C.1.3 del Anexo se muestran las figuras con mayor detalle de la Figura 6.10, en la sección C.1.2 del Anexo se muestran los tiempos de transporte del trazador desde el glaciar hasta el estero, y en las secciones C.1.4 y C.1.5 del Anexo se presentan las velocidades en función de las zonas ubicadas perpendicular y paralelo al fondo, respectivamente.

## 6.4. Comparación entre Gravedad No Inclinada (GNI) y Gravedad Inclinada (GI)

Además de llevar a cabo el caso de Gravedad No Inclinada (GNI), se realizó el caso Gravedad Inclinada (GI), el cual consta de poseer un vector de gravedad con cierto grado de inclinación (ver Capítulo 5 para más detalles).

En la Figura 6.15, se presentan las razones entre los tiempos de transporte del trazador desde la zona glaciar al estero de los casos de GNI ( $t_{GNI}$ ) y GI ( $t_{GI}$ ). Arriba de cada barra se muestra el tiempo obtenido para cada caso en función del tipo de textura.

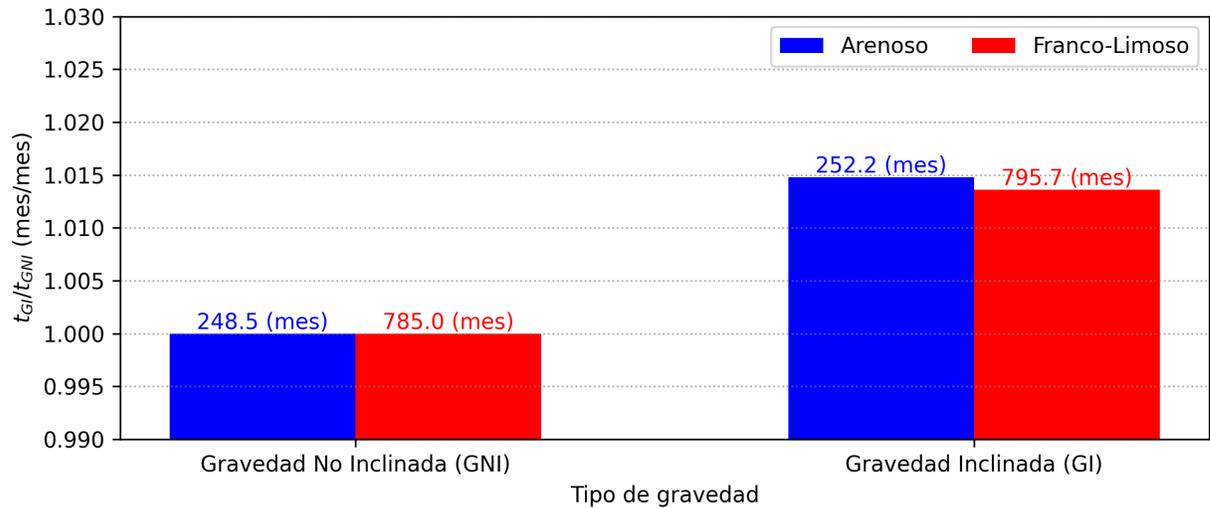


Figura 6.15: Comparación de tiempos de transporte del trazador desde la zona glaciara hasta el estero para los casos de Gravedad No Inclinada (GNI) y Gravedad Inclinada (GI) según el tipo de textura.

Se observa que no existe una gran diferencia entre estos tiempos. En el caso de considerar una textura arenosa la razón es mayor que al considerar una textura franco-limosa. La diferencia entre el caso de GI y GNI es de 3,7 meses en una textura arenosa, mientras que en una textura franco-limosa es de 10,7 meses.

Además, se consideró comparar las velocidades al variar la profundidad para los distintos casos. En la Figura 6.16, se presenta la velocidad en función del recorrido perpendicular al fondo del lecho. En la Figura 6.17, se muestra la velocidad en función del recorrido paralelo al fondo del lecho.

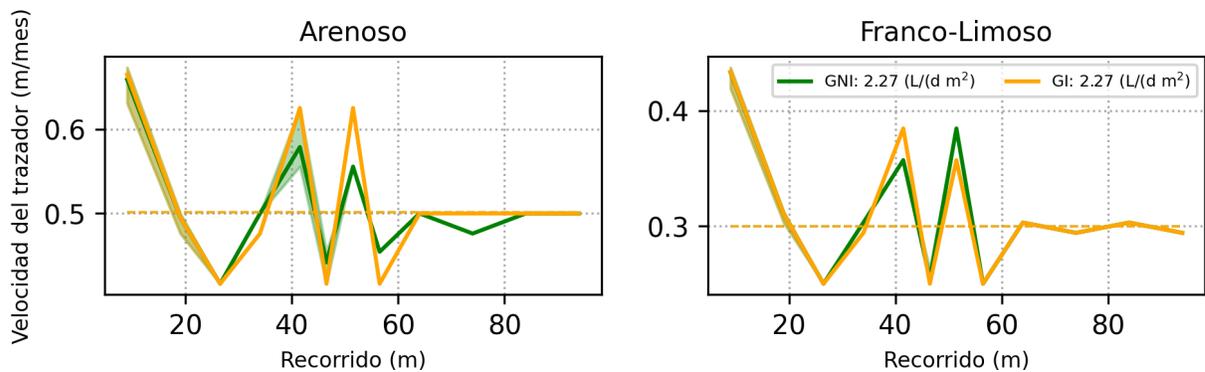


Figura 6.16: Velocidades del trazador en función del recorrido perpendicular al fondo al variar la profundidad del lecho con un aporte hídrico de  $2,27 \text{ L}/(\text{m}^2 \text{ d})$ .

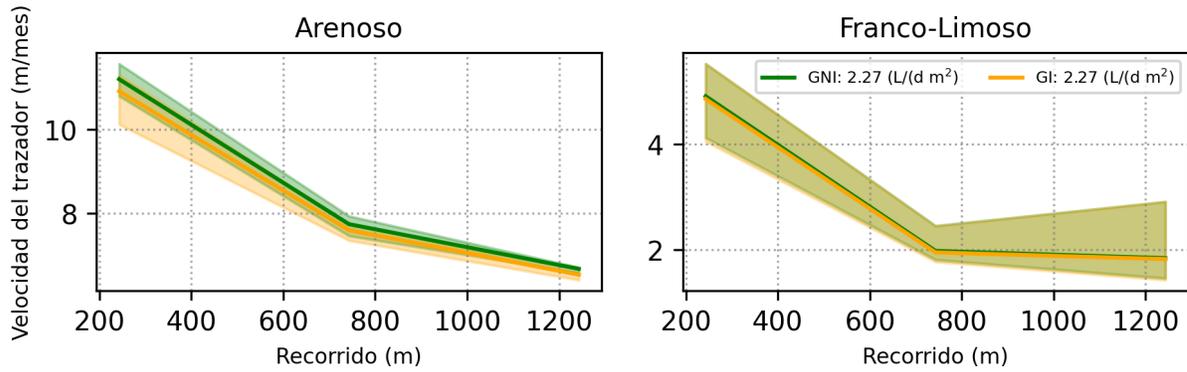


Figura 6.17: Velocidades del trazador en función del recorrido paralelo al fondo al variar la profundidad del lecho con un aporte hídrico de  $2,27 \text{ L}/(\text{m}^2 \text{ d})$ .

En el caso de la primera figura (ver Figura 6.16), se observa que las velocidades son similares tanto para la textura arenosa como franco-limoso. En el caso de la textura arenosa, la velocidad en el caso GI se estabiliza después de recorrer 60 m y permanece constante. Entre los recorridos de 40 m a 60 m, la velocidad en el caso GNI es menor que en el caso GI al considerar una textura arenosa.

Las velocidades en función del recorrido paralelo (ver Figura 6.17), se observa que al considerar una textura arenosa, la velocidad obtenida en el caso GNI es mayor durante todo el recorrido. Mientras que al considerar una textura franco-limoso, ambas velocidades son similares y varían muy poco.

En conclusión, al considerar el vector de gravedad inclinado, el comportamiento del trazador es muy similar. Se observa que el tiempo de transporte de este trazador se demora más en comparación con un vector de gravedad perpendicular al fondo. En el caso de gravedad inclinada (caso GI), el trazador recorre una distancia mayor que en el caso de gravedad perpendicular al fondo y con un grado de inclinación nulo (caso GNI), debido a la inclinación del vector de gravedad. En cuanto al comportamiento de las velocidades, no se observan grandes variaciones entre los dos casos.

# Capítulo 7

## CONCLUSIONES

En virtud de los resultados obtenidos del presente estudio, se concluye que al utilizar el Caso Base en diversos escenarios, los tiempos de llegada al estero difieren igualmente, siendo distintos en cada situación propuesta.

Se observa que al aumentar el aporte hídrico al lecho poroso, también aumenta la diferencia entre los tiempos obtenidos de un lecho arenoso y franco-limoso. En el Escenario 2, considerando un aporte hídrico obtenido de Casassa et al. (2015), con dimensiones de 1500 m de largo y 50 m de profundidad del lecho poroso, se advierten tiempos de transporte de 21,02 y 66,31 años para lechos con textura más gruesa, arenosa, y textura más fina, franco-limosa, respectivamente.

En relación con las velocidades de transporte del trazador, estas dependen del tipo de textura que posea el lecho, la dirección en la cual viaja el compuesto y el aporte hídrico al medio poroso. Además, a partir de la visualización del comportamiento y el análisis de velocidades, se observa que el compuesto al transportarse de manera vertical, desde la inyección al fondo del lecho, se producen velocidades menores que al transportarse de manera horizontal, desde la interacción del compuesto en el fondo hasta el estero. Es importante destacar que la interacción entre el trazador y el fondo, que representa una condición de borde impermeable, es la principal causa a estos comportamientos.

A partir del comportamiento del trazador a través de la concentración de este en el lecho poroso, se observa que cuando el trazador interactúa con el fondo del lecho, que actúa como una capa impermeable, se provocan fluctuaciones de concentraciones de este trazador a lo largo del espacio. Estas ondas son similares a las ondas de densidad de corriente. Sería interesante analizar la longitud de onda de estas fluctuaciones para verificar si es una función dependiente del aporte hídrico y la textura.

En cuanto a la malla considerada en los resultados, que consta de 18750 celdas, se observa un error relativo aproximado del 5 % en comparación con los resultados obtenidos utilizando una malla más fina. Este 5 % de error se calcula a partir de los tiempos obtenidos en meses. Con esta malla, se acepta un error con respecto a una malla más fina, considerándolo aceptable en relación con los valores de tiempos obtenidos, que varían entre decenas y centenas de años.

La regresión potencial es la mejor descripción para los tiempos obtenidos con las distintas

mallas. Donde esta regresión tiene la forma  $\text{Tiempo} = a \cdot \text{Cantidad de celdas}^b$ , donde los coeficientes  $a$  y  $b$  son funciones dependientes del aporte hídrico y del tipo de textura. Para un aporte hídrico igual a  $2,27 \text{ L}/(\text{m}^2 \text{ d})$ , el coeficiente  $a = f(\text{Aporte hídrico}, \text{Textura})$  es igual a 356,28 y 918,82 para texturas arenosa y franco-limosa, respectivamente, mientras que el coeficiente  $b = g(\text{Aporte hídrico}, \text{Textura})$  es igual a  $-0,035$  y  $-0,016$  para texturas arenosa y franco-limosa, respectivamente. A partir de esto, se observa una relación logarítmica ligeramente negativa entre el tiempo y la cantidad de celdas.

Con respecto a las velocidades obtenidas al variar la cantidad de celdas en la malla, se observa que las velocidades del trazador en el recorrido entre el glaciar y el fondo del lecho son menores que las velocidades obtenidas en el recorrido paralelo al fondo del lecho. Cabe destacar que la velocidad en el recorrido perpendicular al fondo son similares a las velocidades obtenidas con la solución analítica propuesta por Vanderborgh et al. (2005). Una vez que el trazador entra en contacto con el fondo del lecho, acelera y alcanza velocidades altas.

En el caso de considerar un aporte hídrico igual a  $2,27 \text{ L}/(\text{m}^2 \text{ d})$ , las velocidades en el recorrido perpendicular al fondo son aproximadamente de 0,7 a 0,8 m/mes en una textura arenosa y de 0,4 a 0,5 m/mes en una textura franco-limosa. Mientras que las velocidades en el recorrido paralelo al fondo son aproximadamente de 9 a 15 m/mes en una textura arenosa y 2 a 8 m/mes en una textura franco-limosa.

En relación con la variación de área de inyección por la cual ingresa el aporte hídrico del glaciar al medio poroso, se observa que, al aumentar el área de inyección, el tiempo de llegada al estero disminuye. Esta diferencia entre tiempos de llegada va a depender del escenario en el cual se está analizando, del área de inyección considerada y del tipo de textura que posea el lecho. Los tiempos obtenidos al variar el área de inyección se describen a través de una regresión potencial ( $\text{Tiempo} = a \cdot \text{Área de Inyección}^b$ ), al considerar un aporte hídrico igual a  $2,27 \text{ L}/(\text{m}^2 \text{ d})$  los valores del coeficiente  $a$  es igual 13500 y 143000 para texturas arenosa y franco-limosa, respectivamente, y el coeficiente  $b$  es igual a  $-0,652$  y  $-0,854$  para texturas arenosa y franco-limosa, respectivamente.

En cuanto a las velocidades, se observa que al interactuar el fondo con el trazador se produce un aceleramiento en el comportamiento de este. También se advierte que esta interacción provoca velocidades altas en el recorrido horizontal del trazador en comparación con las del recorrido vertical.

Sobre la variación de profundidad, los tiempos de llegada al estero difieren según la profundidad, escenario y lecho considerado. Los tiempos obtenidos al variar la profundidad se describen a través de una regresión potencial ( $\text{Tiempo} = a \cdot \text{Profundidad}^b$ ), donde el coeficiente  $a$  es igual 48,4 y 97,1 para texturas arenosa y franco-limosa, respectivamente, y el coeficiente  $b$  es igual a 0,425 y 0,519 para texturas arenosa y franco-limosa, respectivamente, al poseer un aporte hídrico de  $2,27 \text{ L}/(\text{m}^2 \text{ d})$ .

Con respecto a las velocidades, se concluye que a medida que la profundidad es mayor, la velocidad en el eje vertical se estabiliza y permanece constante a medida que se acerca al fondo del lecho. Por el contrario, no posee velocidades constantes a lo largo de la horizontal. Al considerar una profundidad menor, las velocidades del trazador se estabilizan en las zonas

cercanas al lecho, pero fluctúan al estar cerca del fondo del lecho en el eje vertical.

Con respecto a los resultados obtenidos al variar el largo del lecho, se observa que los tiempos de llegada al estero pueden variar dependiendo del escenario y lecho considerado. Los tiempos obtenidos al variar el largo se describen a través de una regresión potencial ( $\text{Tiempo} = a \cdot \text{Largo}^b$ ), al considerar un aporte hídrico igual a  $2,27 \text{ L}/(\text{m}^2 \text{ d})$  los valores del coeficiente  $a$  es igual  $0,0417$  y  $0,18$  para texturas arenosa y franco-limosa, respectivamente, y el coeficiente  $b$  es igual a  $1,19$  y  $1,15$  para texturas arenosa y franco-limosa, respectivamente.

En cuanto a las velocidades del compuesto al recorrer la horizontal, se observa que a pesar de considerar distintos largos la velocidad del trazador va decreciendo hasta llegar al estero.

Al comparar los tiempos de llegada al estero obtenidos entre los casos de Gravedad No Inclinada (GNI) y de Gravedad Inclinada (GI), se observa que los tiempos obtenidos son mayores para los resultados de GI. Esto debido a que el trazador recorre distancias mayores en el caso de GI que el caso GNI.

Con respecto a las velocidades, se observa que estas son similares, independientemente de si se utiliza el caso GNI o GI, y no difieren significativamente a medida que el trazador recorre el lecho. Además, en ambos casos, el fondo del lecho, considerado como una condición de borde impermeable, afecta el comportamiento del trazador y provocan un aumento en las velocidades.

Para finalizar, cabe destacar que los aportes hídricos estudiados no son valores de infiltración al medio poroso, son valores de aporte hídrico totales por parte del Glaciar La Paloma donde estos pueden distribuirse de manera superficial como subterránea. Por lo tanto, este factor puede afectar los valores obtenidos e implicarían que los tiempos de llegada al estero con caudales menores sean mucho mayor. En el caso que se quiera estudiar estos valores en el software DuMu<sup>x</sup>, las simulaciones requerirán un considerable aumento en el tiempo de ejecución, por lo que se recomienda un computador con una capacidad de procesamiento de datos superior. Esto último también es crucial para la selección de la malla, ya que un computador con alta capacidad de procesamiento permitirá seleccionar una malla más fina y obtener resultados con menores errores relativos entre mallas.

# Nomenclatura

$()^\kappa$	Superíndice del componente.
$()_\alpha$	Subíndice de la fase del fluido.
$()_n$	Subíndice de la fase que no moja, gaseosa o aire.
$()_w$	Subíndice de la fase que moja, líquida o agua.
$\lambda$	Índice de Brooks & Corey que relaciona la distribución de los poros en el medio poroso, [-]
$\mathbf{g}$	Vector de la aceleración de gravedad, [m/s <sup>2</sup> ]
$\mathbf{v}_\alpha$	Vector de velocidad en la fase $\alpha$ , [m/s]
$D_{\alpha,pm}^\kappa$	Coefficiente de difusión efectivo del componente $\kappa$ en la fase $\alpha$ , [m <sup>2</sup> /s]
$k$	Permeabilidad intrínseca del medio poroso, [m <sup>2</sup> ]
$K$	Conductividad hidráulica del medio poroso, [m/s]
$\mu_\alpha$	Viscosidad dinámica del fluido en la fase $\alpha$ , [kg/(m s)]
$\phi$	Porosidad del medio poroso, [m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]
$\Phi_\alpha^\kappa$	Coefficiente de fugacidad, [-]
$\rho_\alpha^m$	Densidad molar del fluido en la fase $\alpha$ , [mol/m <sup>3</sup> ]
$\rho_\alpha$	Densidad del fluido en la fase $\alpha$ , [kg/m <sup>3</sup> ]
$\tau_\alpha$	Tortuosidad de la fase $\alpha$ , [-]
$\theta_\alpha$	Fracción volumétrica en la fase $\alpha$ , [m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]
$A$	Área, [m <sup>2</sup> ]
$D_\alpha^\kappa$	Coefficiente de difusión molecular del componente $\kappa$ en la fase fluida $\alpha$ , [m <sup>2</sup> /s]
$f_\alpha^\kappa$	Fugacidad del componente $\kappa$ en la fase fluida $\alpha$ , [Pa]
$h$	Altura piezométrica, [m]
$k_{r\alpha}$	Permeabilidad relativa en la fase $\alpha$ , [-]
$M_\alpha$	Masa en la fase $\alpha$ , [kg]

$n_{\alpha}^{\kappa}$	Número de moles del componente $\kappa$ en la fase $\alpha$ , [mol]
$p_c$	Presión capilar, [Pa]
$p_e$	Presión de aire de entrada o presión burbujeante, [Pa]
$Q$	Caudal, [m <sup>3</sup> /s]
$q$	Vector de descarga específica, [m/s]
$q_{\alpha}^{\kappa}$	Término fuente volumétrico de entrada o salida en el REV, [kg/(m <sup>3</sup> s)]
$S_{\alpha}$	Saturación en la fase $\alpha$ , [m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]
$S_{\alpha}^{max}$	Saturación máxima de la fase $\alpha$ , [m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]
$S_{\alpha}^{min}$	Saturación mínima de la fase $\alpha$ , [m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]
$S_{e\alpha}$	Saturación efectiva de la fase $\alpha$ , [m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]
$S_{r\alpha}$	Saturación residual de la fase $\alpha$ , [m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]
$V_{\alpha}$	Volumen en la fase $\alpha$ , [m <sup>3</sup> ]
$V_v$	Volumen del espacio poroso o de vacíos en el REV, [m <sup>3</sup> ] y del total ( $V_{REV}$ )
$V_{REV}$	Volumen total en el REV, [m <sup>3</sup> ] en el REV
$x_{\alpha}^{\kappa}$	Fracción molar del componente $\kappa$ en la fase $\alpha$ , [-]
$\mathbf{q}$	Vector de la descarga específica, [m/s]
REV	Volumen Elemental Representativo.

# Bibliografía

- Ahusborde, E., Kern, M., y Vostrikov, V. (2015). Numerical simulation of two-phase multicomponent flow with reactive transport in porous media: application to geological sequestration of CO<sub>2</sub>. *ESAIM: Proceedings and Surveys*, 50, 21-39. doi: 10.1051/proc/201550002
- Bear, J. (2018). *Modeling phenomena of flow and transport in porous media* (Vol. 31). Springer International Publishing. doi: 10.1007/978-3-319-72826-1
- Bear, J., y Cheng, A. H.-D. (2010). *Modeling groundwater flow and contaminant transport*. Springer Netherlands. doi: 10.1007/978-1-4020-6682-5
- Brooks, R., y Corey, A. (1964). *Hydraulic properties of porous media*. Colorado State University.
- Bunsri, T., Sivakumar, M., y Hagare, D. (2008). Numerical modelling of tracer transport in unsaturated porous media. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 1. doi: 10.36884/jafm.1.01.11838
- Casassa, G., Apey, A., Bustamante, M., Marangunic, C., Salazar, C., y Soza, D. (2015). Contribución hídrica de glaciares en el estero yerba loca y su extrapolación a la cuenca del río maipo. En *XIV congreso geológico chileno, área temática 3: Geología del cuaternario y cambio climático, sesión temática 10: Efectos directos e indirectos del cambio climático*. La Serena, Chile.
- Cea, R. G., de la Fuente Karlezi, L. M., Vernet, R. A., Márquez, F. O., Ribes, J. C., Martínez, W. A. P., ... Castillo, J. H. (2022). *Antecedentes socio-ecológicos del SN yerba loca: pasado, presente y futuro* (F. Orrego, R. Ginocchio, L. M. de la Fuente, y D. Parra, Eds.).
- Charte, R., Soto, M., Oblasser, A., Calderón R., C., Hoppe, J., Farfán S., N., ... others (2015). Guía metodológica para la estabilidad química de faenas e instalaciones mineras.
- Dingman, S. L. (2015). *Physical hydrology* (Third ed.). Waveland Press, Inc.
- Egiebor, N. O., y Oni, B. (2007, 1). Acid rock drainage formation and treatment: a review. *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering*, 2, 47-62. doi: 10.1002/apj.57
- Fitts, C. R. (2002). *Groundwater science* (First ed.). Academic Press.
- Flemisch, B. (2013). *Tackling coupled problems in porous media : development of numerical models and an open source simulator* (Tesis Doctoral). doi: <http://dx.doi.org/10.18419/opus-499>
- Flemisch, B., Darcis, M., Erbertseder, K., Faigle, B., Lauser, A., Mosthaf, K., ... Helmig, R. (2011). Dumux: Dune for multi-phase, component, scale, physics, ... flow and transport in porous media. *Advances in Water Resources*, 34, 1102-1112. (New Computational

- Methods and Software Tools) doi: <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2011.03.007>
- Freeze, R. A., y Cherry, J. A. (1979). *Groundwater*. Prentice-Hall. Inc., Englewood Cliffs.
- Hidrica Consultores. (2019). *Modelación hidrogeológica conceptual del Proyecto Los Bronces Integrado* (Informe Técnico HI-18-27). AngloAmerican Sur. (REV. V2)
- Hubbert, M. K. (1940). The theory of ground-water motion. *Source: The Journal of Geology*, 48, 785-944. (Recuperado de <https://www.jstor.org/stable/30057101>)
- Jaime Illanes & Asociados. (2019a). *Estudio de Impacto Ambiental: Proyecto Los Bronces Integrado* (Inf. Téc.). AngloAmerican. (Capítulo 3.5: Geología)
- Jaime Illanes & Asociados. (2019b). *Estudio de Impacto Ambiental: Proyecto Los Bronces Integrado* (Inf. Téc.). AngloAmerican. (Capítulo 3.14: Suelo)
- Karmakar, S., Tatomir, A., Oehlmann, S., Giese, M., y Sauter, M. (2022). Numerical benchmark studies on flow and solute transport in geological reservoirs. *Water*, 14, 1310. doi: 10.3390/w14081310
- Koch, T., Gläser, D., Weishaupt, K., Ackermann, S., Beck, M., Becker, B., ... Flemisch, B. (2021). Dumux 3 – an open-source simulator for solving flow and transport problems in porous media with a focus on model coupling. *Computers & Mathematics with Applications*, 81, 423-443. doi: 10.1016/J.CAMWA.2020.02.012
- Majdalani, S., y Guinot, V. (2023). Solute transport in heterogeneous model porous media under different flow rates: Experimental and modelling study. *Journal of Hydrology*, 616, 128790. doi: 10.1016/j.jhydrol.2022.128790
- Marcoleta, L. J. (2019). *Hidro-glaciología de glaciares rocosos y descubiertos en los andes de chile central* (Tesis de Master). (Disponible en <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/173422>)
- Radišić, I. (2020). *Mathematical modeling and numerical simulation of multiphase multicomponent flow in porous media* (Tesis doctoral). University of Zagreb, Zagreb.
- Reid, T. E. P. (2013). *Thermodynamics, statistical thermodynamics, & kinetics* (3ed. ed.). Pearson, Prentice Hall.
- Rivera, A., Bown, F., Carrión, D., Caro, D., Gimeno, F., Farías, D., y Cisternas, S. (2011). *Variaciones recientes de glaciares en Chile, según principales zonas glaciológicas* (Inf. Téc.). Dirección General de Aguas.
- Scheer, D., Class, H., y Flemisch, B. (2021). *Subsurface environmental modelling between science and policy*. Springer International Publishing. doi: 10.1007/978-3-030-51178-4
- Szymkiewicz, A. (2013). *Modelling water flow in unsaturated porous media*. Springer Berlin Heidelberg. doi: 10.1007/978-3-642-23559-7
- Toro, J. C., Ortúzar, J., Zamorano, J., Cuadra, P., Hermosilla, J., y Spröhnle, C. (2012). Protracted magmatic-hydrothermal history of the río blanco-los bronces district, central Chile: Development of world's greatest known concentration of copper. *Geology and Genesis of 35 Major Copper Deposits and Districts of the World: A Tribute to Richard H. Sillitoe*, 105-126.
- Valenzuela-Díaz, M. J., Navarrete-Calvo, A., Caraballo, M. A., McPhee, J., García, A., Correa-Burrows, J. P., y Navarro-Valdivia, L. (2020). Hydrogeochemical and environmental water quality standards in the overlap between high mountainous natural

- protected areas and copper mining activities (Mapocho river upper basin, Santiago, Chile). *Journal of Hydrology*, 588. doi: 10.1016/j.jhydrol.2020.125063
- Vanderborght, J., Kasteel, R., Herbst, M., Javaux, M., Thiery, D., Vanclooster, M., . . . Vereecken, H. (2005). A set of analytical benchmarks to test numerical models of flow and transport in soils. *Vadose Zone Journal*, 4, 206-221. doi: 10.2113/4.1.206
- Younes, A., Fahs, M., y Ackerer, P. (2021). Modeling of flow and transport in saturated and unsaturated porous media. *Water*, 13, 1088. doi: 10.3390/w13081088
- Zegers, G., Navarro-Valdivia, L., Lagos-Zuñiga, M., Navarrete-Calvo, A., Caraballo, M. A., Niño, Y., . . . Montserrat, S. (2021). An integrated modeling approach for mineral and metal transport in acidic rivers at high mountainous porphyry cu systems. *Journal of Hydrology*, 602, 126718. doi: 10.1016/J.JHYDROL.2021.126718
- Álvaro Antonio Navarrete-Calvo. (2020). *Control hidrológico y geoquímico en las variaciones espaciales y temporales del drenaje ácido de roca en cuencas andinas de alta montaña (Yerba Loca, Chile)* (Tesis de Master). (Disponible en <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/177141>)

# Anexos

## Anexo A. ZONA DE ESTUDIO

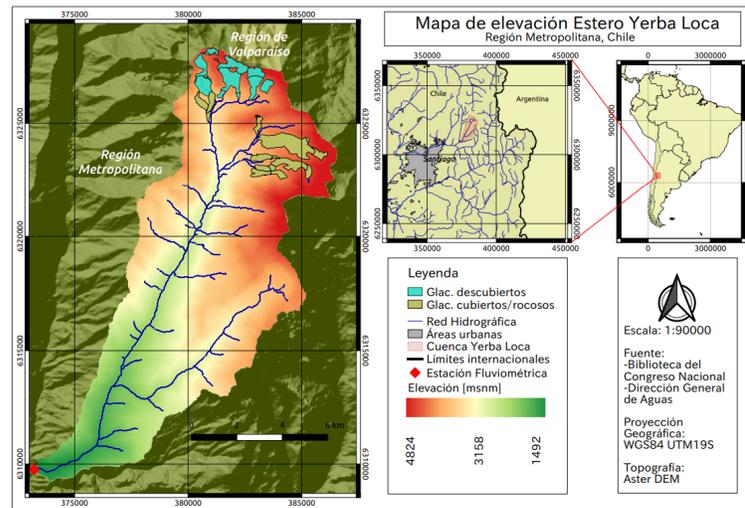


Figura A.1: Mapa ubicación de la cuenca Estero Yerba Loca.  
Fuente: Marcoleta (2019).

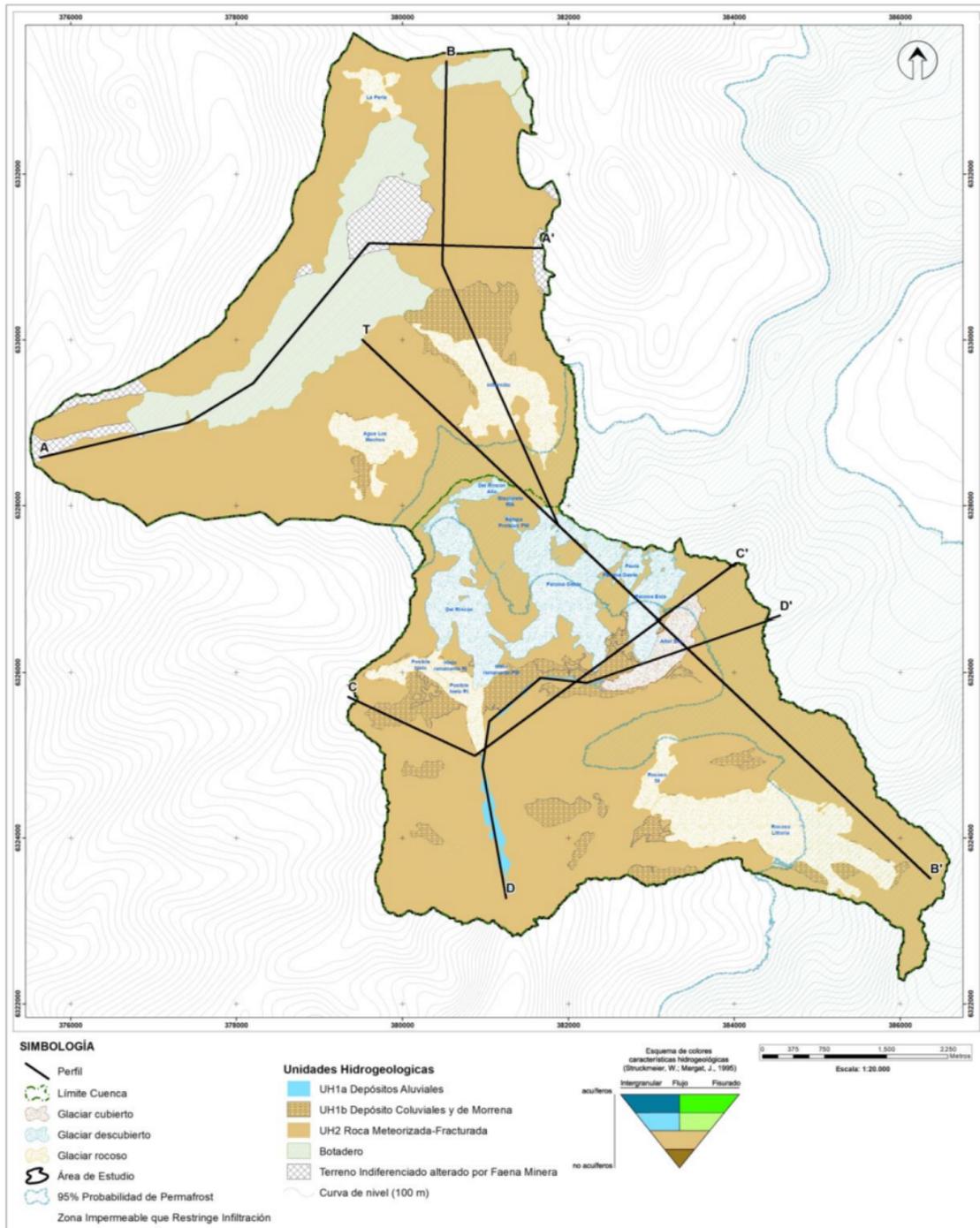


Figura A.2: Mapa hidrogeológico y distribución de perfiles.  
Fuente: Hidrica Consultores (2019).

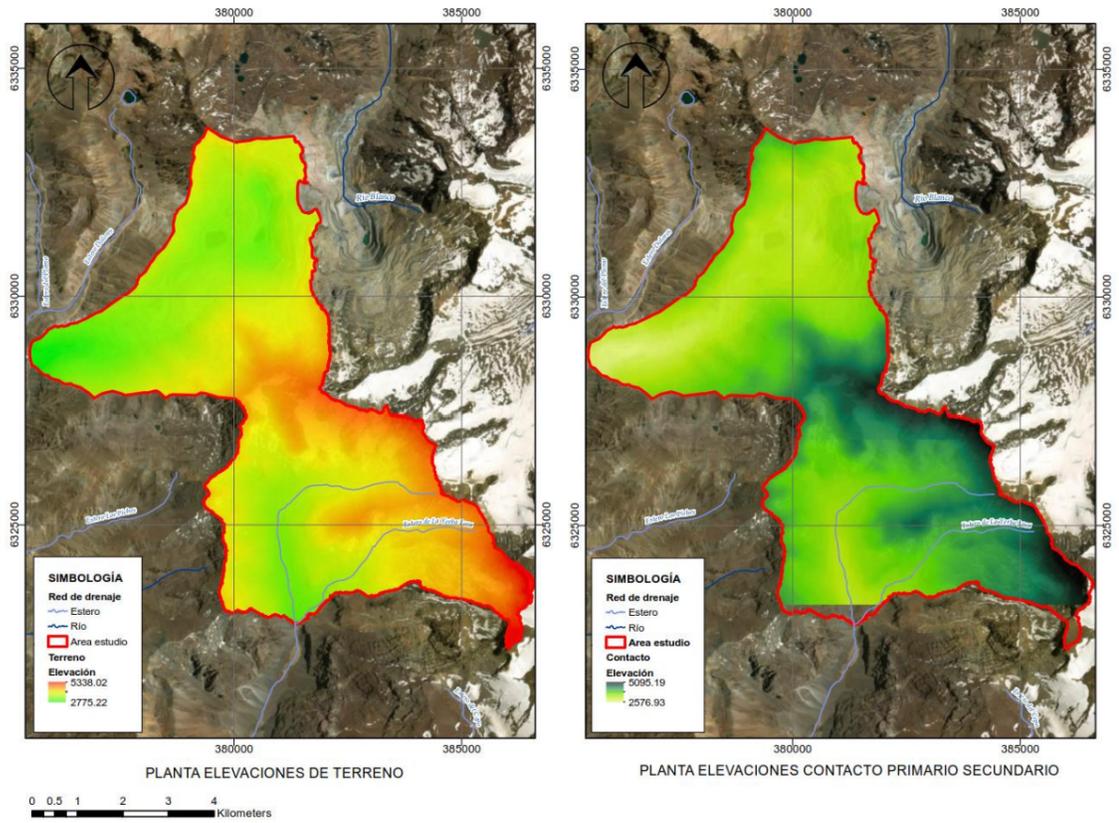


Figura A.3: Elevaciones del Contacto Primario-Secundario.  
Fuente: Hidrica Consultores (2019).

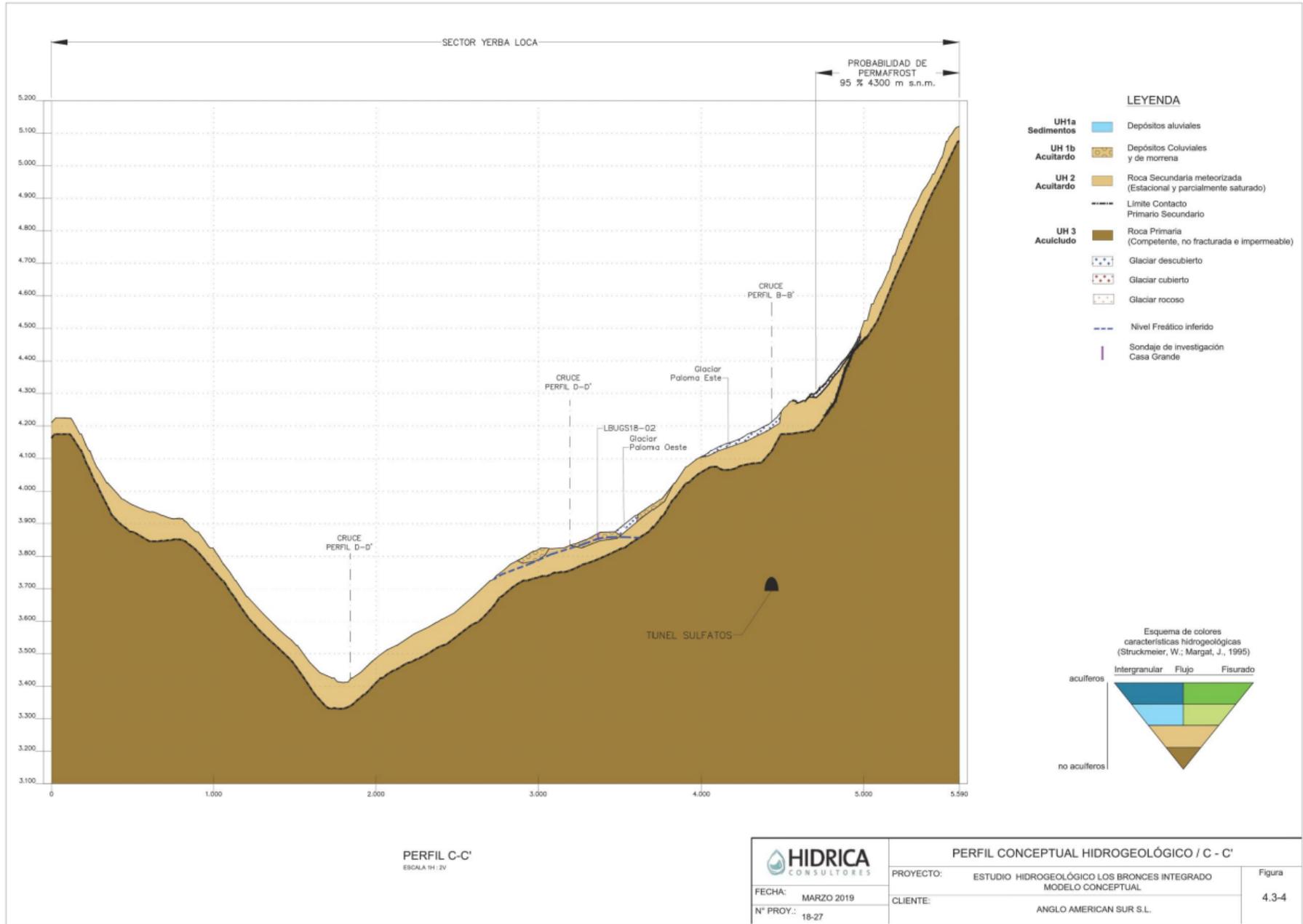


Figura A.4: Perfil hidrogeológico C-C'.  
Fuente: Hidrica Consultores (2019).

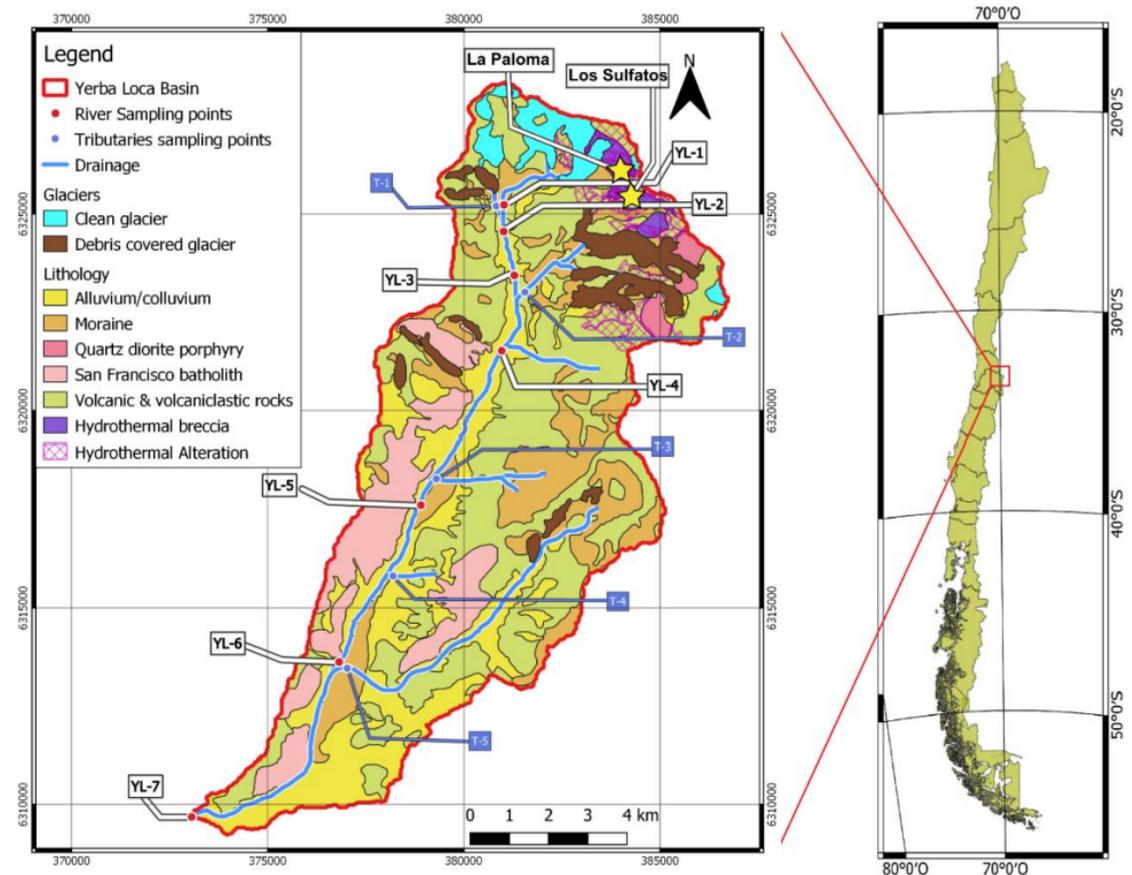


Figura A.5: Mapa de alteración hidrotermal.  
 Fuente: Álvaro Antonio Navarrete-Calvo (2020).

## Anexo B. MODELACIÓN NUMÉRICA

### B.1. Variaciones y sus escenarios

#### Gravedad no inclinada

Importante destacar que en las Tablas B.1 y B.2 se observa que los datos se entregan del tipo  $[i \ j]$ , en donde  $i$  es la cantidad de celdas en el eje horizontal de la malla y  $j$  es para el eje vertical.

Tabla B.1: Valores considerados en la variación de la cantidad de celdas en la malla para los diferentes escenarios con una textura arenosa.

Escenarios			
1	2	3	4
600 20	300 10	600 20	600 20
750 25	600 20	750 25	750 25
1500 50	750 25	1500 50	1500 50
	1500 50		
	1860 62		
	3000 100		

Tabla B.2: Valores considerados en la variación de la cantidad de celdas en la malla para los diferentes escenarios con una textura franco-limosa.

Escenarios			
1	2	3	4
600 20	300 10	600 20	600 20
750 25	600 20	750 25	750 25
1500 50	750 25	1500 50	1500 50
	1500 50		

Tabla B.3: Valores considerados en la variación de área de inyección para los diferentes escenarios con textura arenosa o franco-limosa.

Escenarios			
1	2	3	4
225 (m)	225 (m)	225 (m)	225 (m)
350 (m)	350 (m)	350 (m)	350 (m)
450 (m)	450 (m)	450 (m)	450 (m)
550 (m)	550 (m)	550 (m)	550 (m)
900 (m)	900 (m)	900 (m)	900 (m)

Tabla B.4: Valores considerados en la variación de profundidades del lecho poroso para los diferentes escenarios con textura arenosa o franco-limosa.

Escenarios			
1	2	3	4
25 (m)	25 (m)	25 (m)	25 (m)
40 (m)	40 (m)	40 (m)	40 (m)
50 (m)	50 (m)	50 (m)	50 (m)
60 (m)	60 (m)	60 (m)	60 (m)
100 (m)	100 (m)	100 (m)	100 (m)

Tabla B.5: Valores considerados en la variación de largo en el lecho poroso para los diferentes escenarios con textura arenosa.

Escenarios			
1	2	3	4
1500 (m)	1500 (m)	1500 (m)	1500 (m)
5000 (m)	2500 (m)	2500 (m)	2500 (m)
	5000 (m)	5000 (m)	5000 (m)

Tabla B.6: Valores considerados en la variación de largo en el lecho poroso para los diferentes escenarios con textura franco-limosa.

Escenarios			
1	2	3	4
1500 (m)	1500 (m)	1500 (m)	1500 (m)
5000 (m)	2500 (m)	2500 (m)	2500 (m)
	5000 (m)	5000 (m)	

## Gravedad inclinada

Tabla B.7: Valores considerados en la variación de la cantidad de celdas en la malla y de profundidad para el Escenario 2 con textura arenosa o franco-limosa.

Escenario 2	
Malla	Profundidad
600 20	25 (m)
750 25	40 (m)
1500 50	50 (m)
	60 (m)
	100 (m)

## B.2. Ubicaciones de las zonas consideradas según su variación

### B.2.1. Variación de malla

Tabla B.8: Ubicaciones de las zonas consideradas en el análisis de variación de la malla.

Zonas	Ubicaciones de las zonas en el lecho poroso			
	$x_{min}$	$x_{max}$	$y_{min}$	$y_{max}$
$z0$	255	260	40	45
$z1$	255	260	30	35
$z2$	255	260	20	25
$z3$	255	260	10	15
$z4$	255	260	0	5
$z5$	498	500	0	5
$z6$	748	750	0	5
$z7$	998	1000	0	5
$z8$	1248	1250	0	5
$z9$	1498	1500	0	5

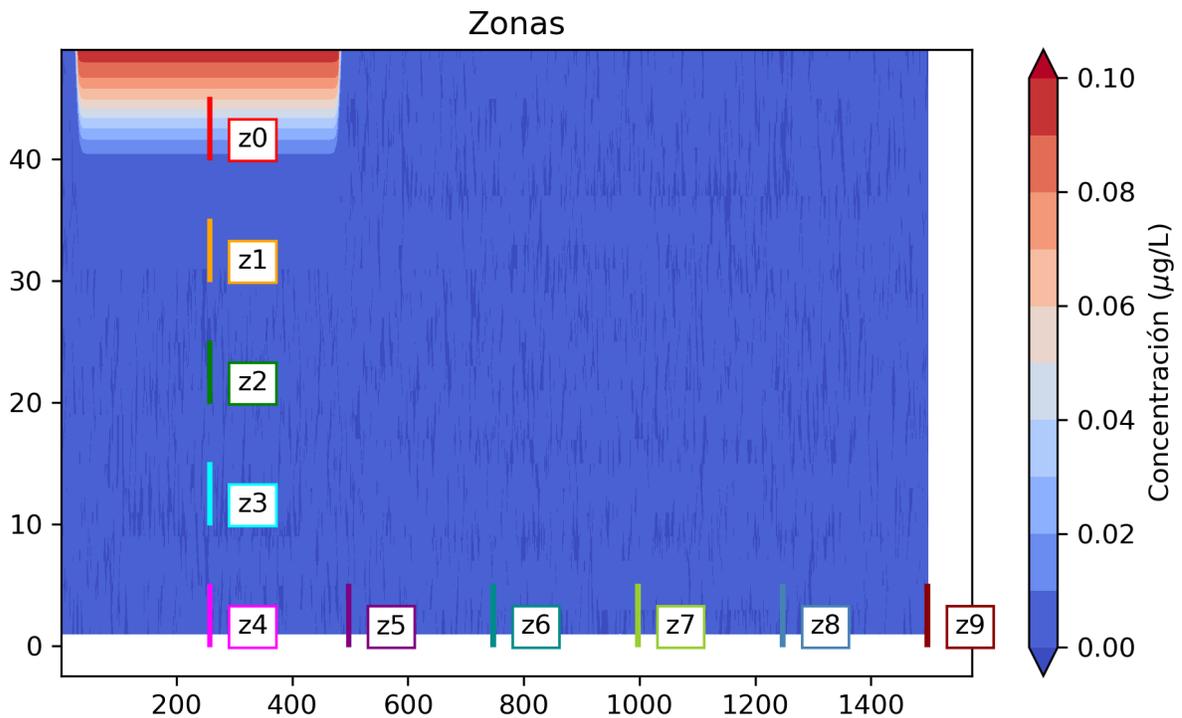


Figura B.1: Ubicaciones de las zonas consideradas en el análisis de variación de la cantidad de celdas en la malla.

### B.2.2. Variación de área de inyección

Tabla B.9: Ubicaciones de las zonas consideradas en el análisis de variación del área de inyección.

Zonas	Ubicaciones de las zonas en el lecho poroso			
	$x_{min}$	$x_{max}$	$y_{min}$	$y_{max}$
$z0$	30	32	40	42
$z1$	30	32	30	32
$z2$	30	32	20	22
$z3$	30	32	10	12
$z4$	30	32	0	2
$z5$	498	500	0	2
$z6$	748	750	0	2
$z7$	998	1000	0	2
$z8$	1248	1250	0	2
$z9$	1498	1500	0	2

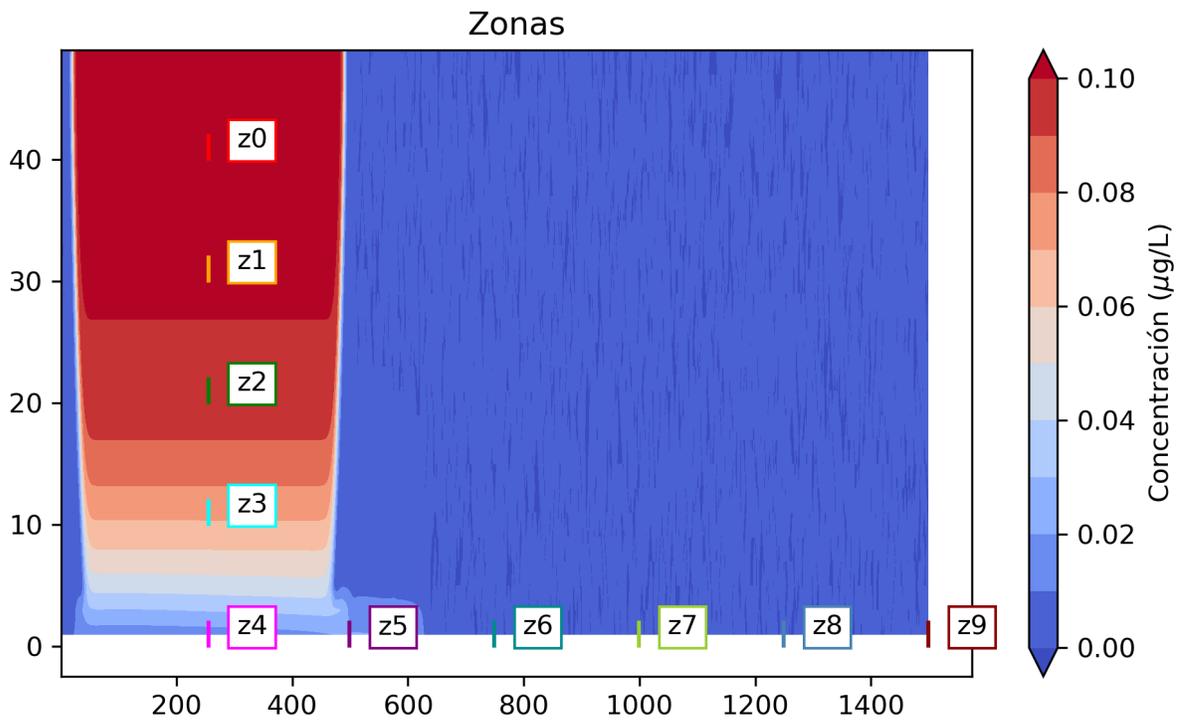


Figura B.2: Ubicaciones de las zonas consideradas en el análisis de variación del área de inyección.

### B.2.3. Variación de profundidad

Tabla B.10: Ubicaciones de las zonas consideradas en el análisis de variación de profundidad utilizando una profundidad de 25 m.

Zonas	Ubicaciones de las zonas en el lecho poroso			
	$x_{min}$	$x_{max}$	$y_{min}$	$y_{max}$
$z0$	255	257	20	22
$z1$	255	257	10	12
$z2$	255	257	0	2
$z13$	498	500	0	2
$z14$	998	1000	0	2
$z15$	1498	1500	0	2

Tabla B.11: Ubicaciones de las zonas consideradas en el análisis de variación de profundidad utilizando una profundidad de 40 m.

Zonas	Ubicaciones de las zonas en el lecho poroso			
	$x_{min}$	$x_{max}$	$y_{min}$	$y_{max}$
$z0$	255	257	35	37
$z1$	255	257	25	27
$z2$	255	257	15	17
$z3$	255	257	10	12
$z4$	255	257	0	2
$z13$	498	500	0	2
$z14$	998	1000	0	2
$z15$	1498	1500	0	2

Tabla B.12: Ubicaciones de las zonas consideradas en el análisis de variación de profundidad utilizando una profundidad de 50 m.

Ubicaciones de las zonas en el lecho poroso				
Zonas	$x_{min}$	$x_{max}$	$y_{min}$	$y_{max}$
$z0$	255	257	45	47
$z1$	255	257	35	37
$z2$	255	257	25	27
$z3$	255	257	20	22
$z4$	255	257	10	12
$z5$	255	257	5	7
$z6$	255	257	0	2
$z13$	498	500	0	2
$z14$	998	1000	0	2
$z15$	1498	1500	0	2

Tabla B.13: Ubicaciones de las zonas consideradas en el análisis de variación de profundidad utilizando una profundidad de 60 m.

Ubicaciones de las zonas en el lecho poroso				
Zonas	$x_{min}$	$x_{max}$	$y_{min}$	$y_{max}$
$z0$	255	257	55	57
$z1$	255	257	45	47
$z2$	255	257	35	37
$z3$	255	257	30	32
$z4$	255	257	20	22
$z5$	255	257	15	17
$z6$	255	257	10	12
$z7$	255	257	5	7
$z8$	255	257	0	2
$z13$	498	500	0	2
$z14$	998	1000	0	2
$z15$	1498	1500	0	2

Tabla B.14: Ubicaciones de las zonas consideradas en el análisis de variación de profundidad utilizando una profundidad de 100 m.

Zonas	Ubicaciones de las zonas en el lecho poroso			
	$x_{min}$	$x_{max}$	$y_{min}$	$y_{max}$
$z0$	255	257	95	97
$z1$	255	257	85	87
$z2$	255	257	75	77
$z3$	255	257	70	72
$z4$	255	257	60	62
$z5$	255	257	55	57
$z6$	255	257	50	52
$z7$	255	257	45	47
$z8$	255	257	40	42
$z9$	255	257	30	32
$z10$	255	257	20	22
$z11$	255	257	10	12
$z12$	255	257	0	2
$z13$	498	500	0	2
$z14$	998	1000	0	2
$z15$	1498	1500	0	2

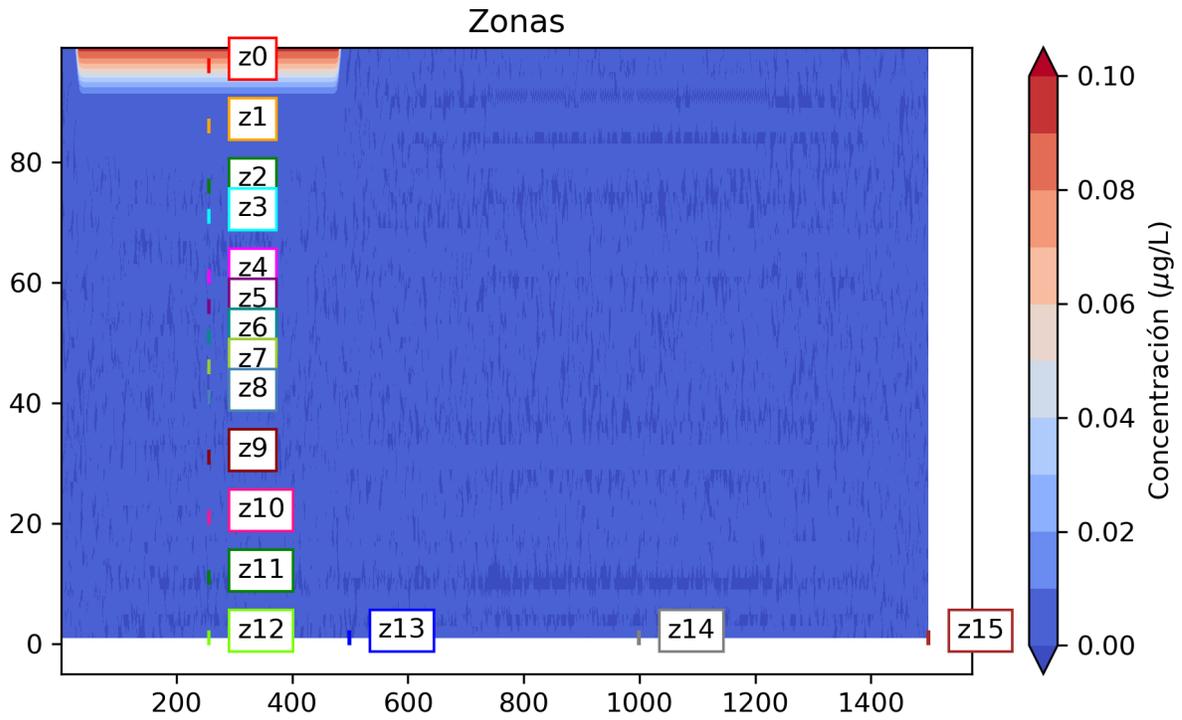


Figura B.3: Ubicaciones de las zonas consideradas en el análisis de variación de la profundidad del lecho.

#### B.2.4. Variación del largo

Tabla B.15: Ubicaciones de las zonas consideradas en el análisis de variación del largo utilizando un largo de 1500 m.

Zonas	Ubicaciones de las zonas en el lecho poroso			
	$x_{min}$	$x_{max}$	$y_{min}$	$y_{max}$
$z0$	498	500	0	2
$z1$	998	1000	0	2
$z2$	1498	1500	0	2

Tabla B.16: Ubicaciones de las zonas consideradas en el análisis de variación del largo utilizando un largo de 2500 m.

Zonas	Ubicaciones de las zonas en el lecho poroso			
	$x_{min}$	$x_{max}$	$y_{min}$	$y_{max}$
$z0$	498	500	0	2
$z1$	998	1000	0	2
$z2$	1498	1500	0	2
$z3$	1998	2000	0	2
$z4$	2498	2500	0	2

Tabla B.17: Ubicaciones de las zonas consideradas en el análisis de variación del largo utilizando un largo de 5000 m.

Zonas	Ubicaciones de las zonas en el lecho poroso			
	$x_{min}$	$x_{max}$	$y_{min}$	$y_{max}$
$z0$	498	500	0	2
$z1$	998	1000	0	2
$z2$	1498	1500	0	2
$z3$	1998	2000	0	2
$z4$	2498	2500	0	2
$z5$	2998	3000	0	2
$z6$	3498	3500	0	2
$z7$	3998	4000	0	2
$z8$	4498	4500	0	2
$z9$	4998	5000	0	2

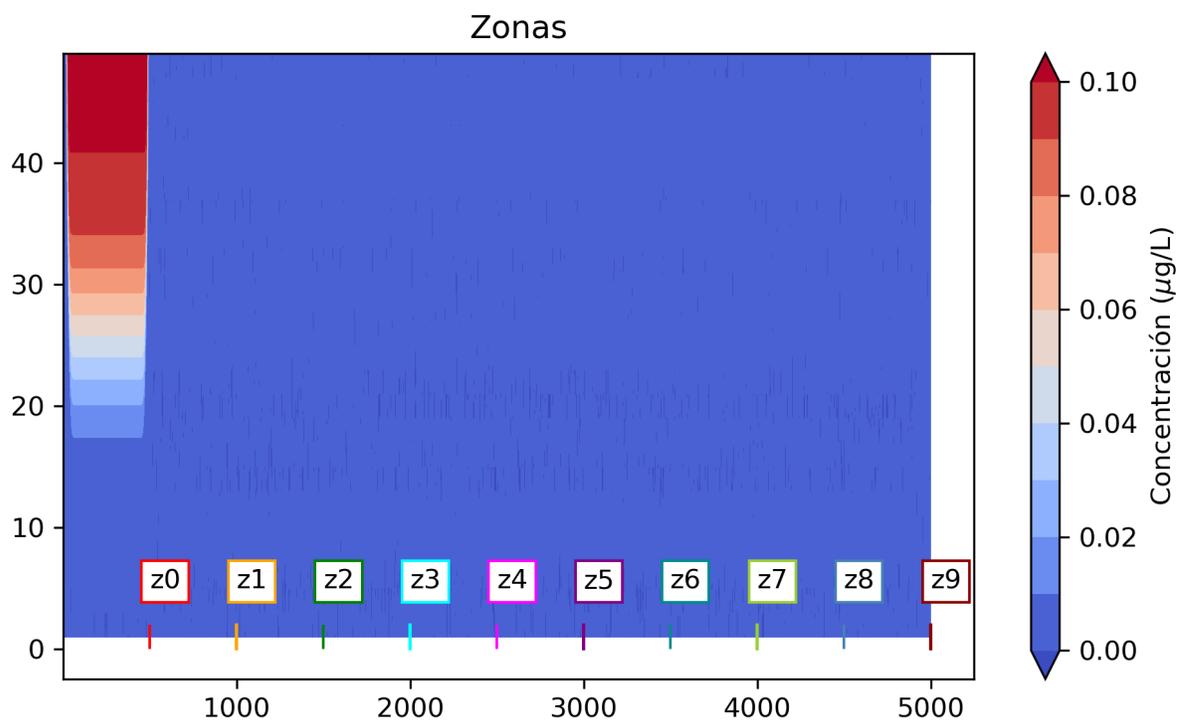


Figura B.4: Ubicaciones de las zonas consideradas en el análisis de variación del largo del lecho.

### B.3. Distancias entre zonas según su variación

### B.3.1. Variación de malla

Tabla B.18: Distancias entre las zonas consideradas en el análisis de variación de la malla.

Zonas	Distancias entre las zonas	
	Horizontales	Verticales
$z0-z1$	0	5
$z1-z2$	0	5
$z2-z3$	0	5
$z3-z4$	0	5
$z4-z5$	241.5	0
$z5-z6$	250	0
$z6-z7$	250	0
$z7-z8$	250	0
$z8-z9$	250	0

### B.3.2. Variación de área de inyección

Tabla B.19: Distancias entre las zonas consideradas en el análisis de variación del área de inyección.

Zonas	Distancias entre las zonas	
	Horizontales	Verticales
$z0-z1$	0	5
$z1-z2$	0	5
$z2-z3$	0	5
$z3-z4$	0	5
$z4-z5$	468	0
$z5-z6$	250	0
$z6-z7$	250	0
$z7-z8$	250	0
$z8-z9$	250	0

### B.3.3. Variación de profundidad

Tabla B.20: Distancias entre las zonas consideradas en el análisis de variación de la profundidad.

Zonas	Distancias entre las zonas	
	Horizontales	Verticales
$z0-z1$	0	10
$z1-z2$	0	10
$z2-z3$	0	5
$z3-z4$	0	10
$z4-z5$	0	5
$z5-z6$	0	5
$z6-z7$	0	5
$z7-z8$	0	5
$z8-z9$	0	10
$z9-z10$	0	10
$z10-z11$	0	10
$z11-z12$	0	10
$z12-z13$	243	0
$z13-z14$	500	0
$z14-z15$	500	0

### B.3.4. Variación del largo

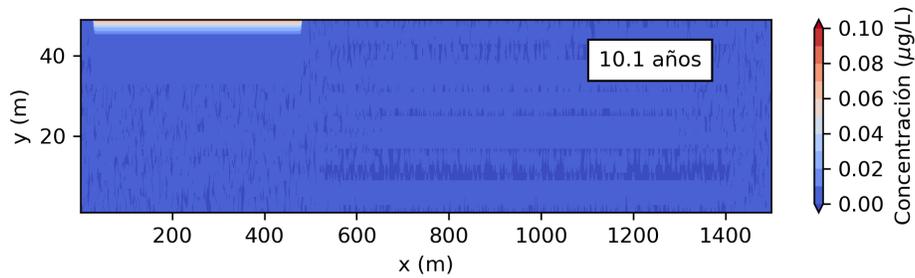
Tabla B.21: Distancias entre las zonas consideradas en el análisis de variación del largo.

Zonas	Distancias entre las zonas	
	Horizontales	Verticales
$z0-z1$	500	0
$z1-z2$	500	0
$z2-z3$	500	0
$z3-z4$	500	0
$z4-z5$	500	0
$z5-z6$	500	0
$z6-z7$	500	0
$z7-z8$	500	0
$z8-z9$	500	0
$z8-z9$	500	0

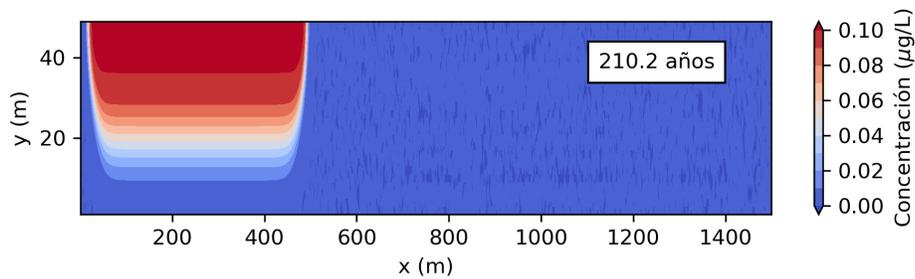
# Anexo C. RESULTADOS Y ANÁLISIS

## C.1. Gravedad No Inclinada (GNI)

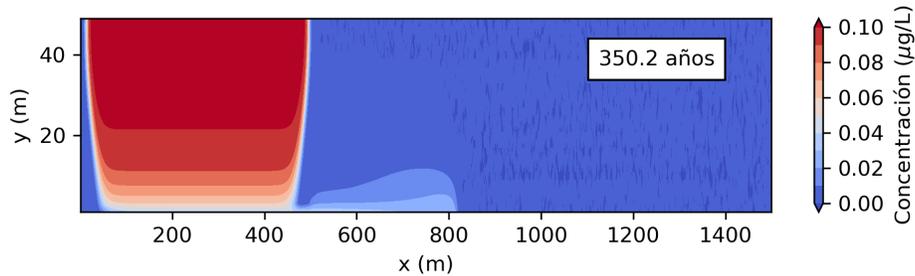
### C.1.1. Concentración del trazador en función de su posición en el lecho



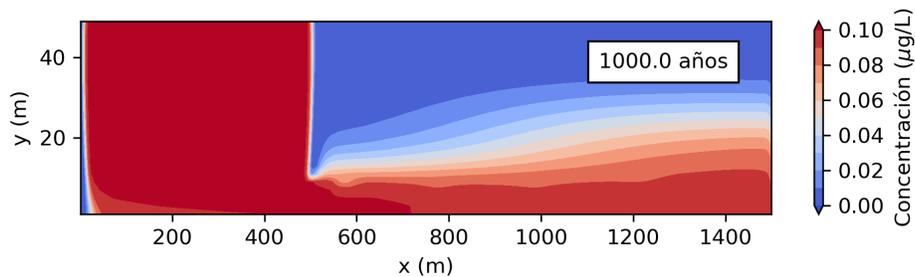
(a) Simulación en 10 años.



(b) Simulación en 210 años.

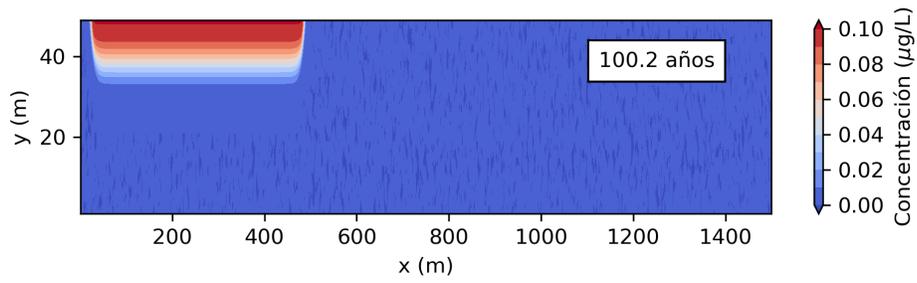


(c) Simulación en 350 años.

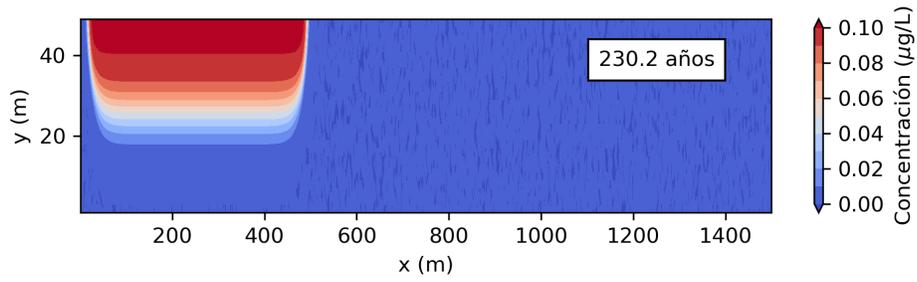


(d) Simulación en 1000 años.

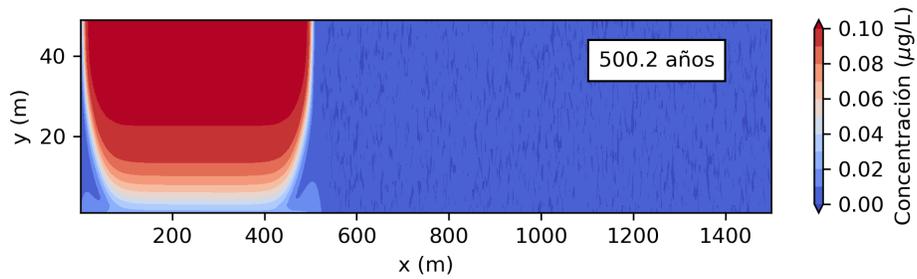
Figura C.1: Concentración del trazador en el lecho poroso con textura arenosa en el Escenario 1. Se visualiza el Caso Base.



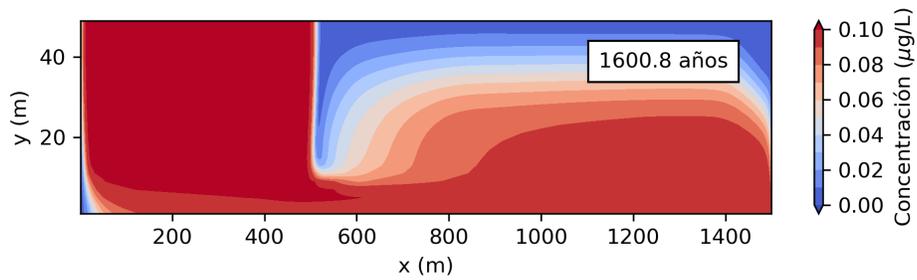
(a) Simulación en 100 años.



(b) Simulación en 230 años.

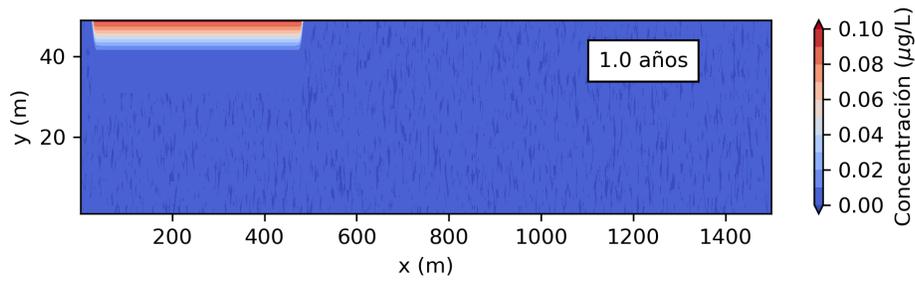


(c) Simulación en 500 años.

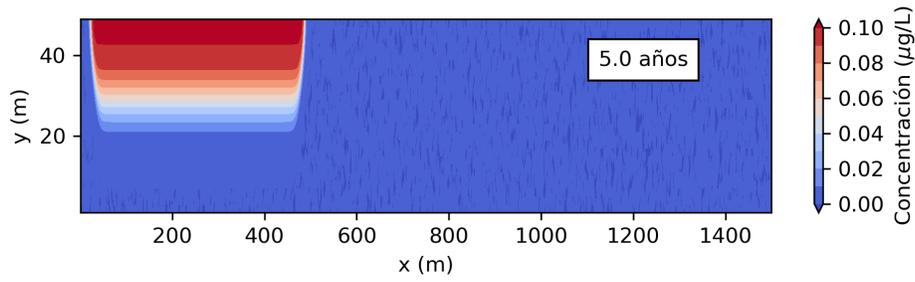


(d) Simulación en 1600 años.

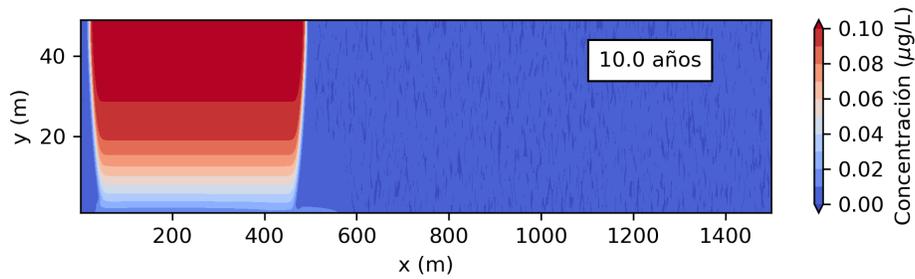
Figura C.2: Concentración del trazador en el lecho poroso con textura franco-limosa en el Escenario 1. Se visualiza el Caso Base.



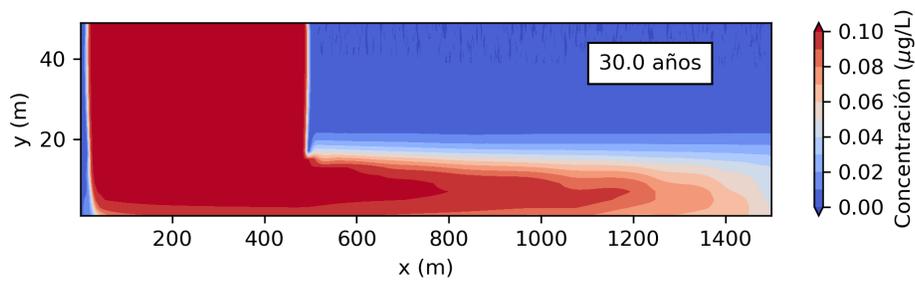
(a) Simulación en 1 año.



(b) Simulación en 5 años.

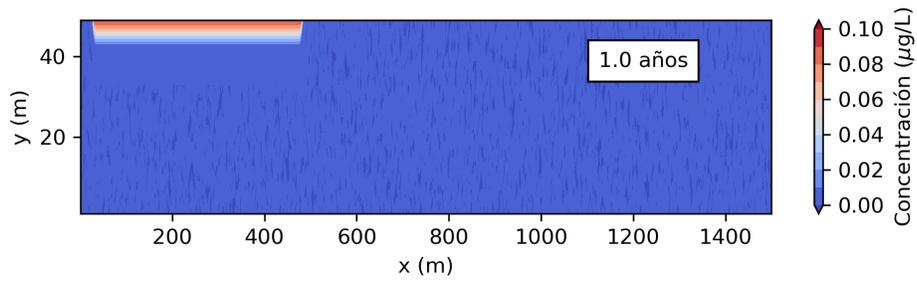


(c) Simulación en 10 años.

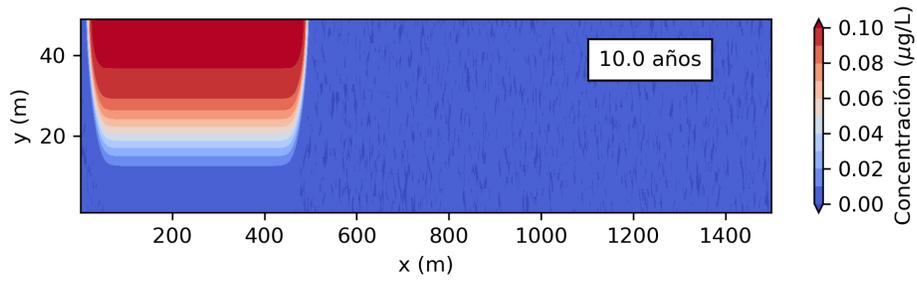


(d) Simulación en 30 años.

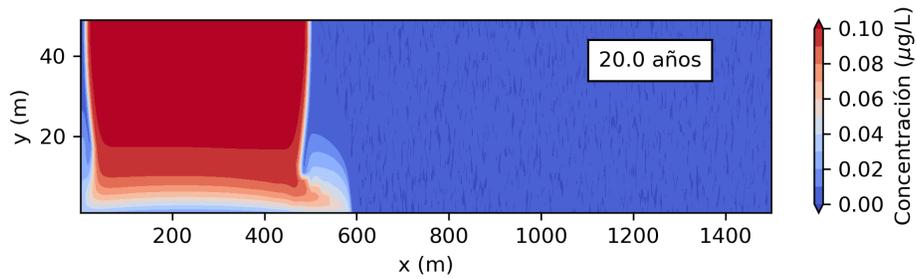
Figura C.3: Concentración del trazador en el lecho poroso con textura arenosa en el Escenario 2. Se visualiza el Caso Base.



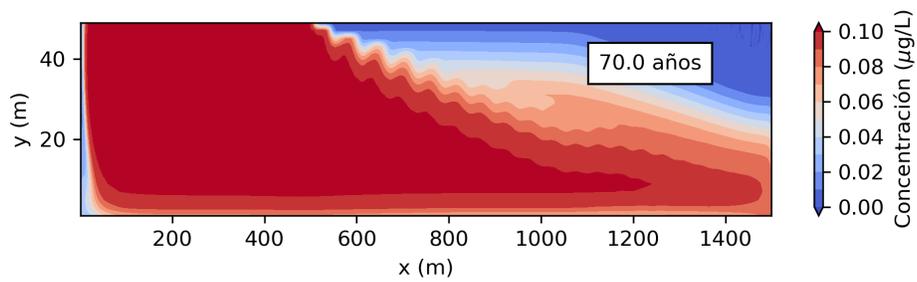
(a) Simulación en 1 año.



(b) Simulación en 10 años.

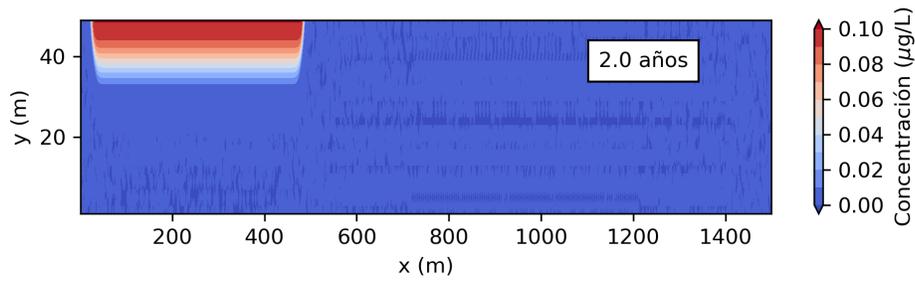


(c) Simulación en 20 años.

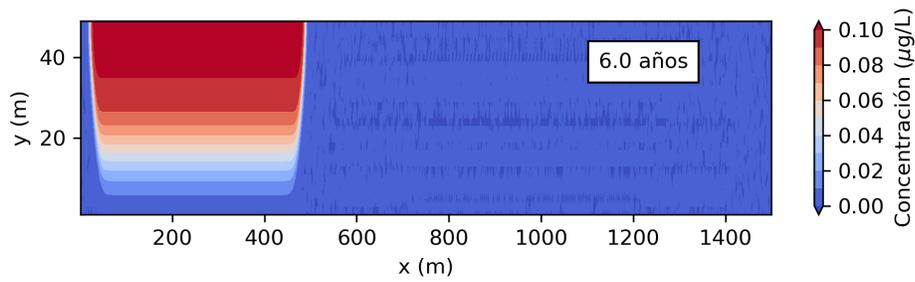


(d) Simulación en 70 años.

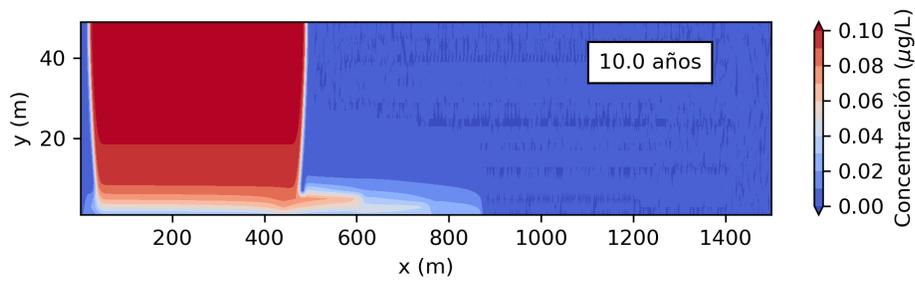
Figura C.4: Concentración del trazador en el lecho poroso con textura franco-limosa en el Escenario 2. Se visualiza el Caso Base.



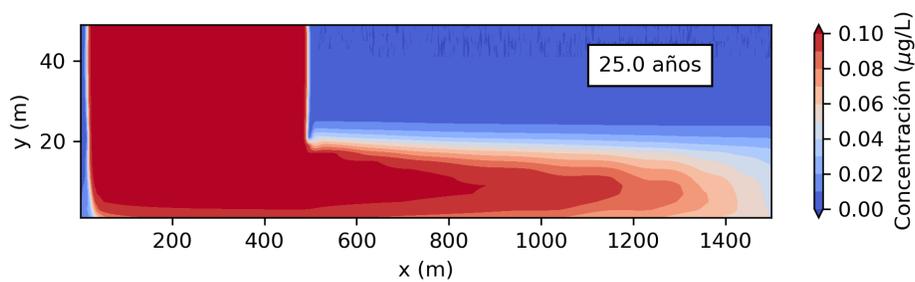
(a) Simulación en 2 años.



(b) Simulación en 6 años.

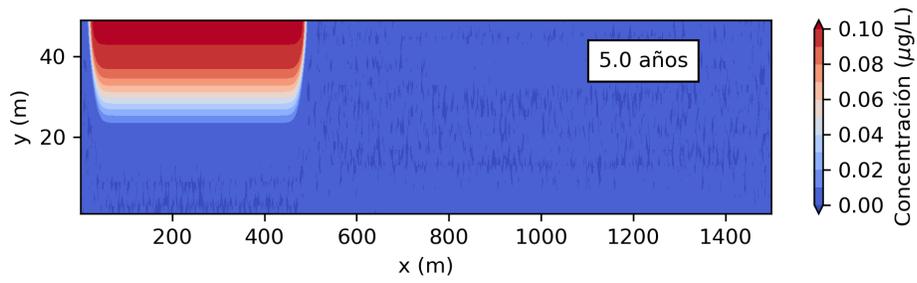


(c) Simulación en 10 años.

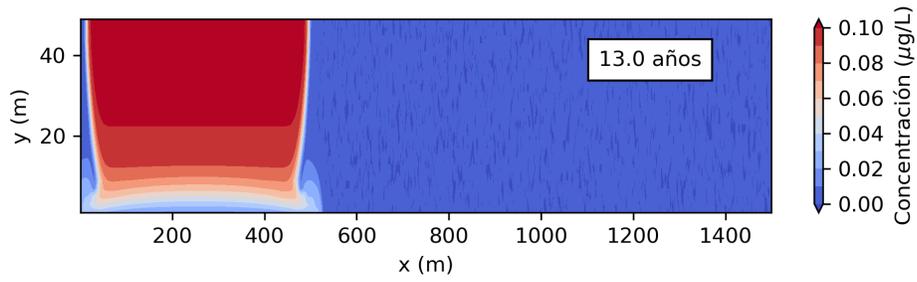


(d) Simulación en 25 años.

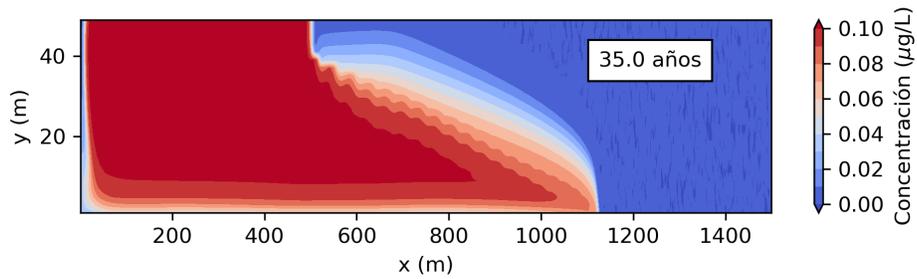
Figura C.5: Concentración del trazador en el lecho poroso con textura arenosa en el Escenario 3. Se visualiza el Caso Base.



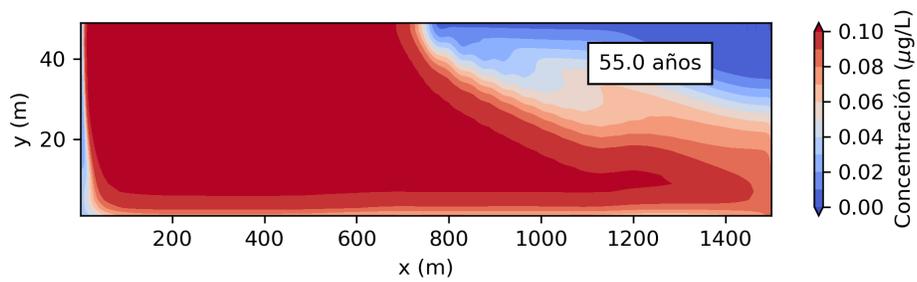
(a) Simulación en 5 años.



(b) Simulación en 13 años.

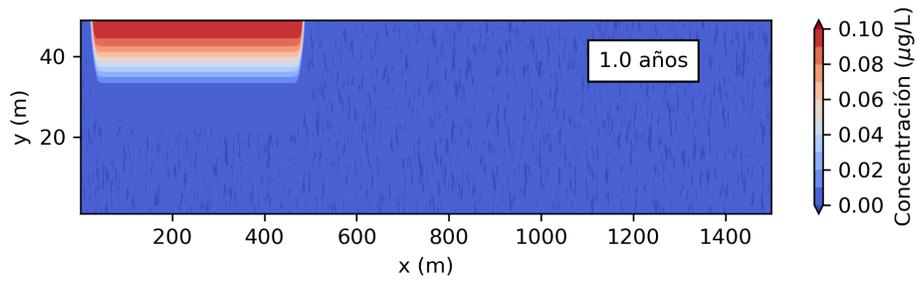


(c) Simulación en 35 años.

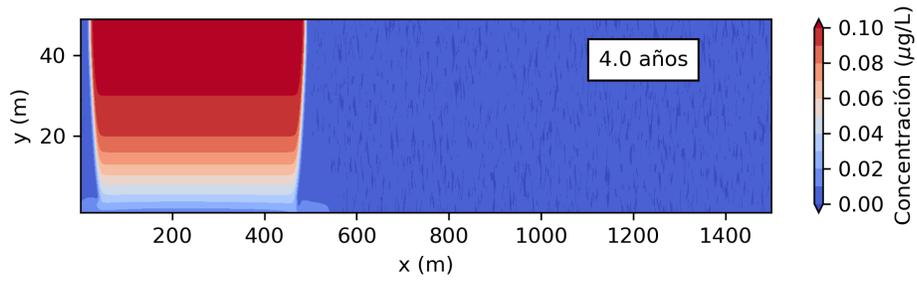


(d) Simulación en 55 años.

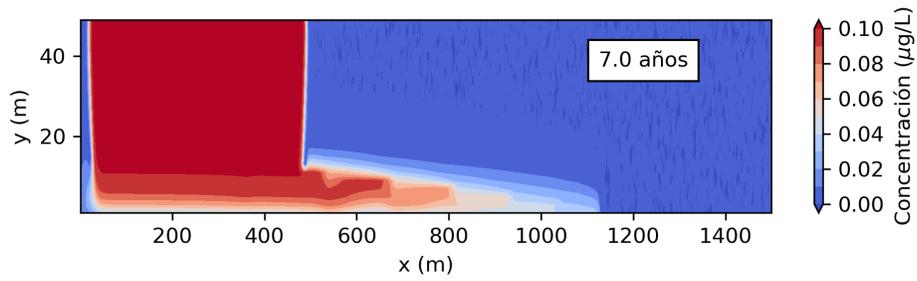
Figura C.6: Concentración del trazador en el lecho poroso con textura franco-limosa en el Escenario 3. Se visualiza el Caso Base.



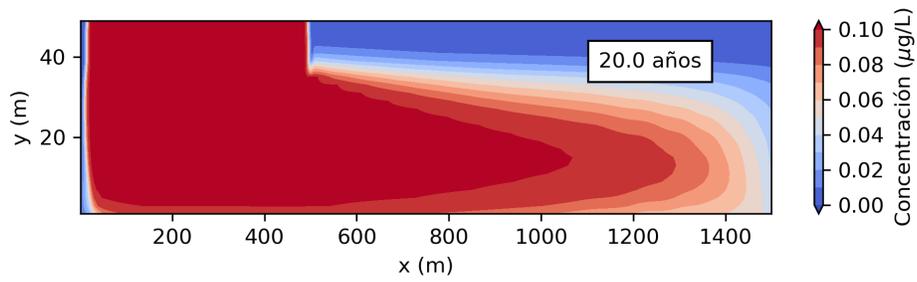
(a) Simulación en 1 año.



(b) Simulación en 4 años.

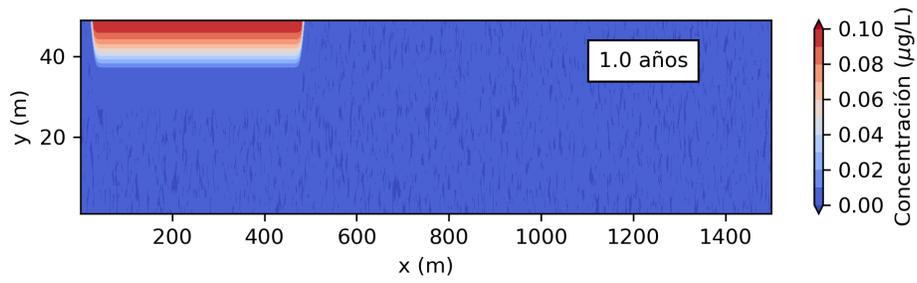


(c) Simulación en 7 años.

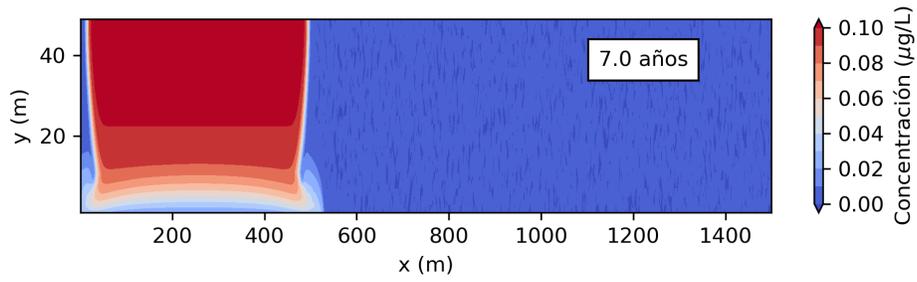


(d) Simulación en 20 años.

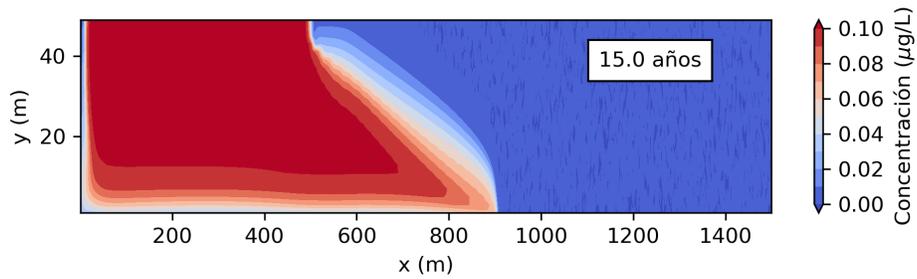
Figura C.7: Concentración del trazador en el lecho poroso con textura arenosa en el Escenario 4. Se visualiza el Caso Base.



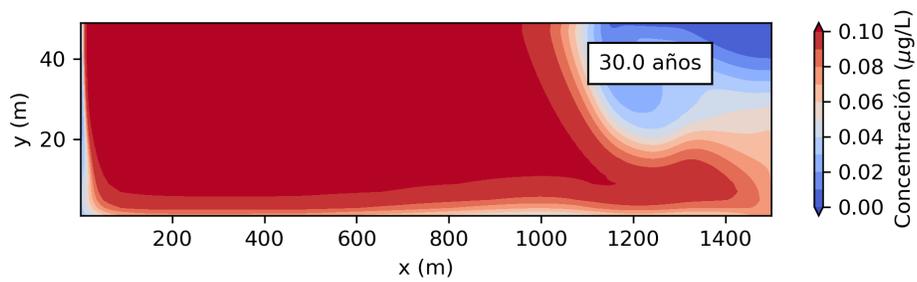
(a) Simulación en 1.0 años.



(b) Simulación en 7.0 años.



(c) Simulación en 15.0 años.



(d) Simulación en 30.0 años.

Figura C.8: Concentración del trazador en el lecho poroso con textura franco-limosa en el Escenario 4. Se visualiza el Caso Base.

C.1.2. Razón entre los tiempos de llegada del trazador al estero en función de las variaciones

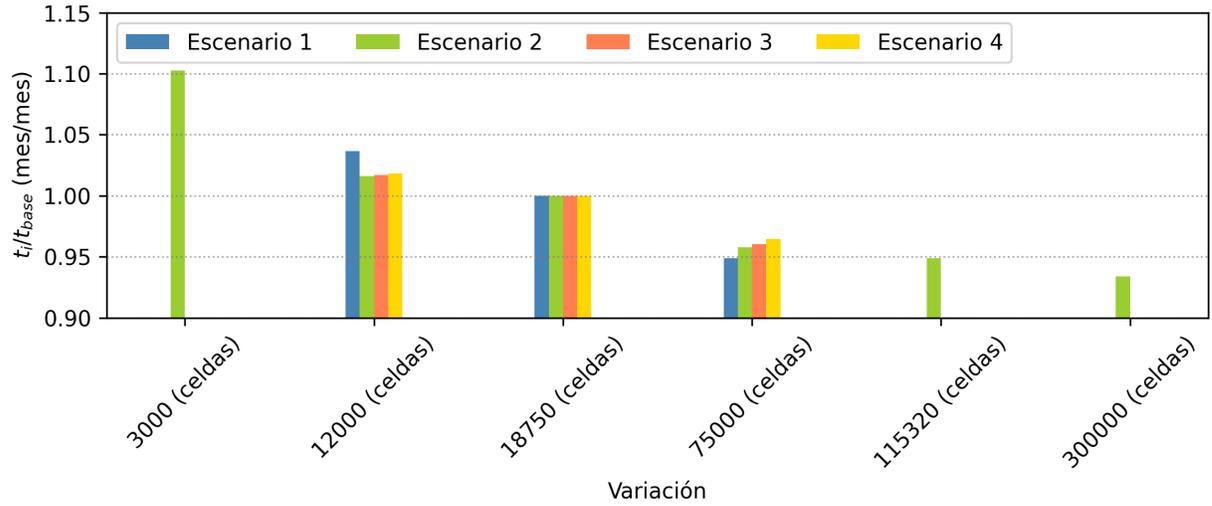


Figura C.9: Razón entre los tiempos de llegada del trazador al estero en función de la variación de la cantidad de celdas en una malla en un lecho arenoso según su escenario.

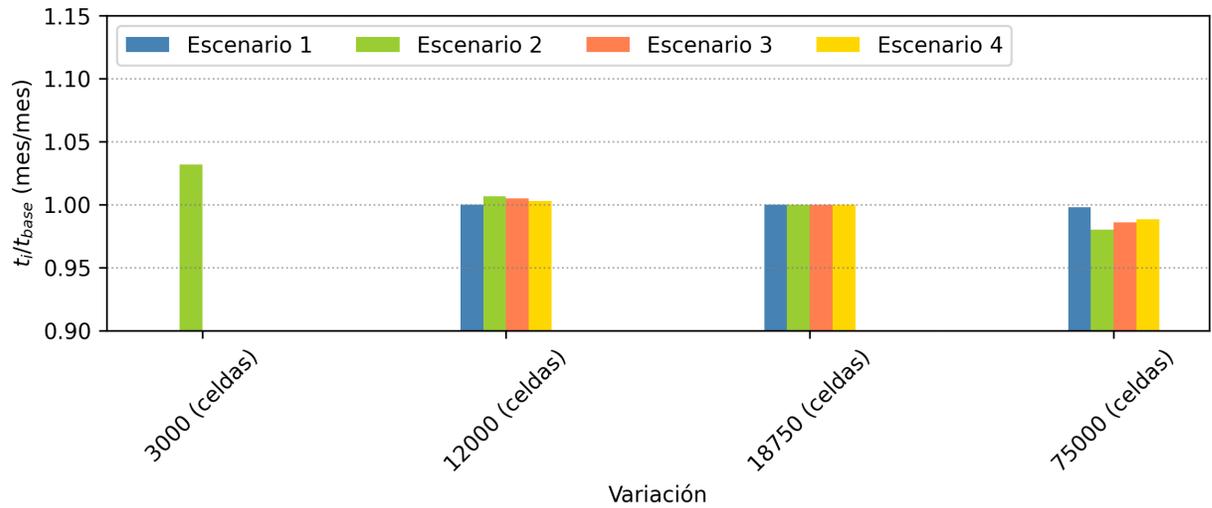


Figura C.10: Razón entre los tiempos de llegada del trazador al estero en función de la variación de la cantidad de celdas en una malla en un lecho franco-limoso según su escenario.

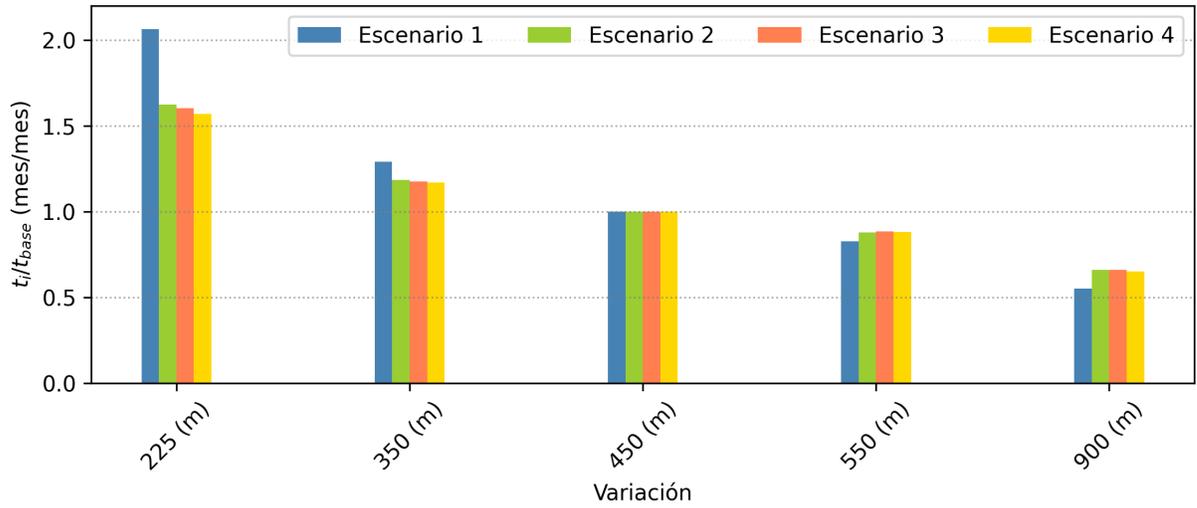


Figura C.11: Razón entre los tiempos de llegada del trazador al estero en función de la variación del área de inyección del aporte hídrico en un lecho arenoso según su escenario.

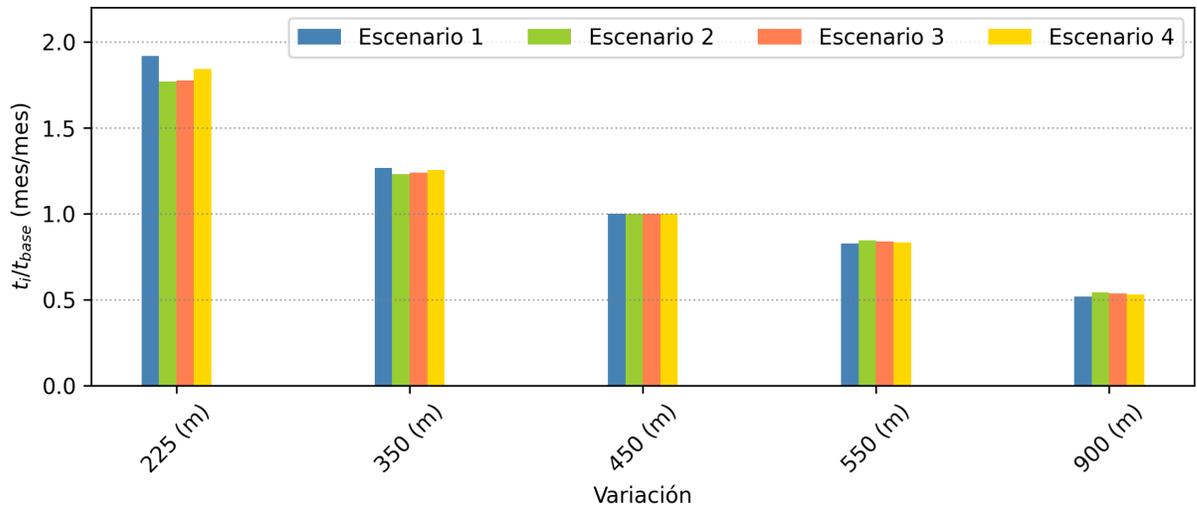


Figura C.12: Razón entre los tiempos de llegada del trazador al estero en función de la variación del área de inyección del aporte hídrico en un lecho arenoso según su escenario.

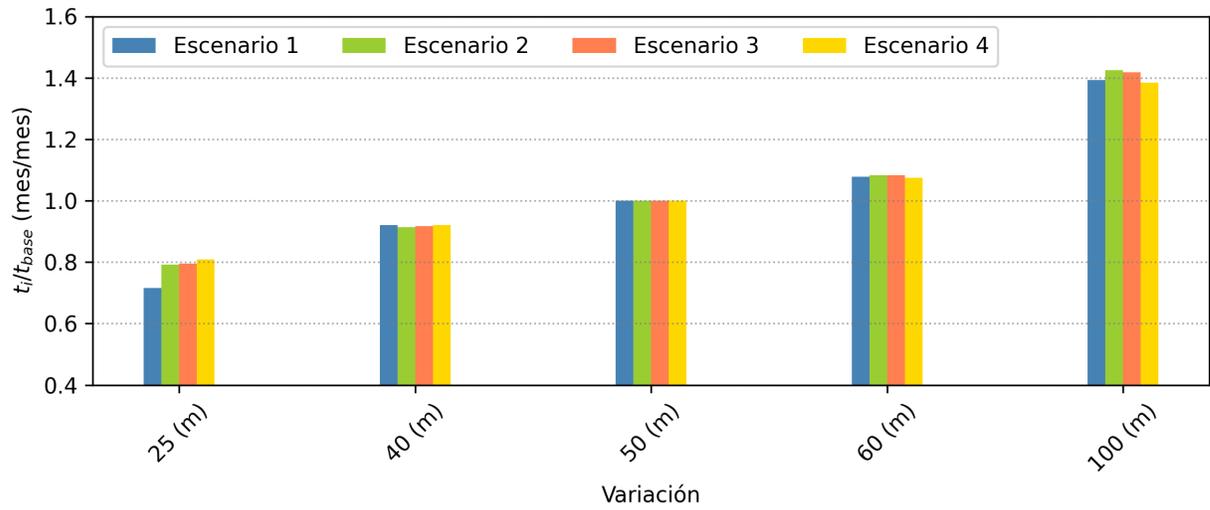


Figura C.13: Razón entre los tiempos de llegada del trazador al estero en función de la variación de la profundidad del lecho poroso arenoso según su escenario.

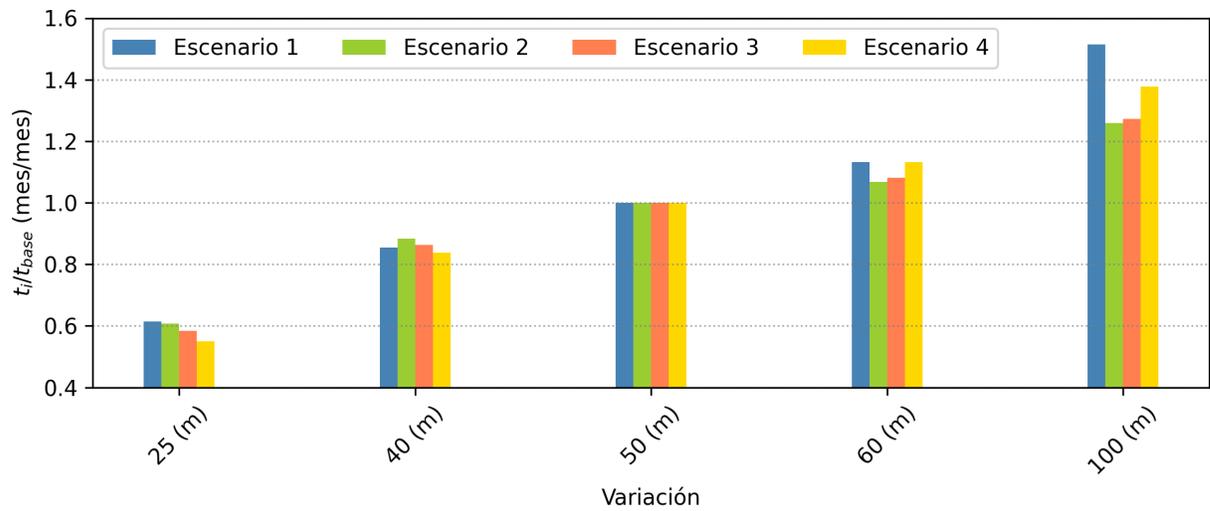


Figura C.14: Razón entre los tiempos de llegada del trazador al estero en función de la variación de la profundidad del lecho poroso franco-limoso según su escenario.

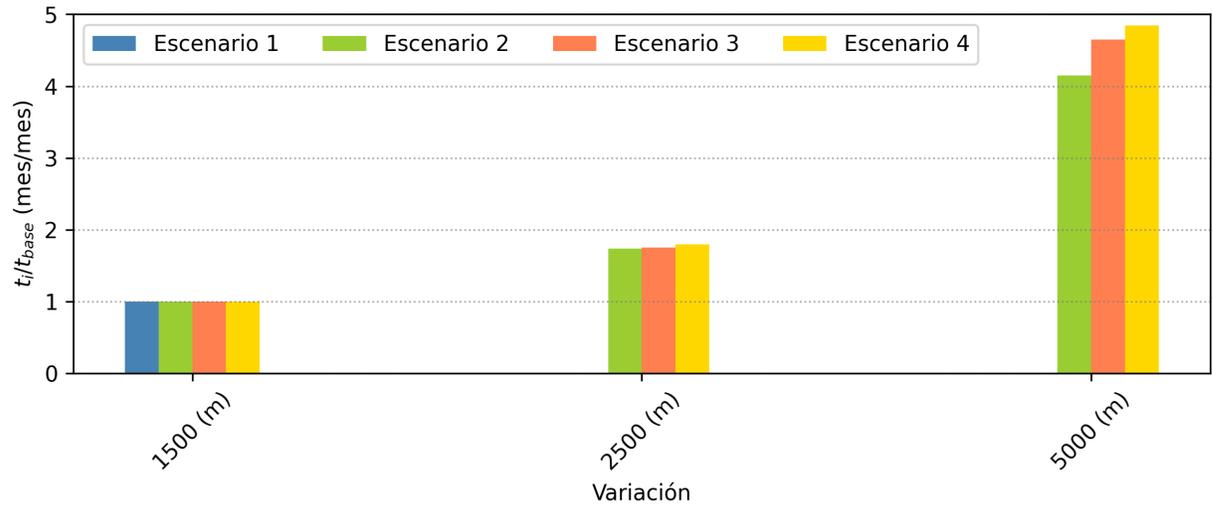


Figura C.15: Razón entre los tiempos de llegada del trazador al estero en función de la variación del largo del lecho poroso arenoso según su escenario.

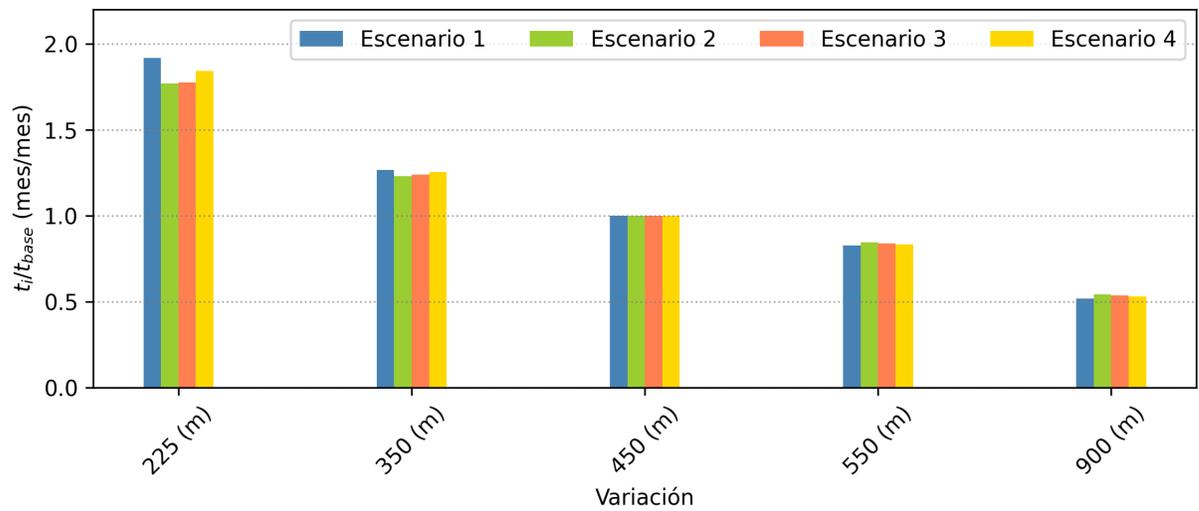


Figura C.16: Razón entre los tiempos de llegada del trazador al estero en función de la variación del largo del lecho poroso franco-limoso según su escenario.

### C.1.3. Tiempos de llegada del trazador al estero en función de las variaciones

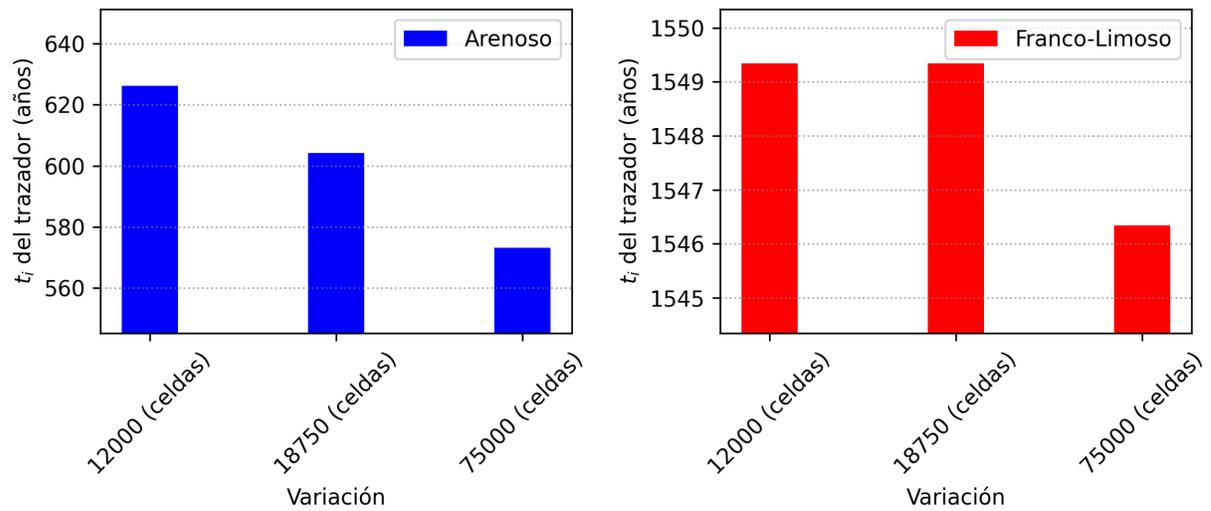


Figura C.17: Tiempos de llegada del trazador al estero en función de la variación de la cantidad de celdas en una malla en el Escenario 1.

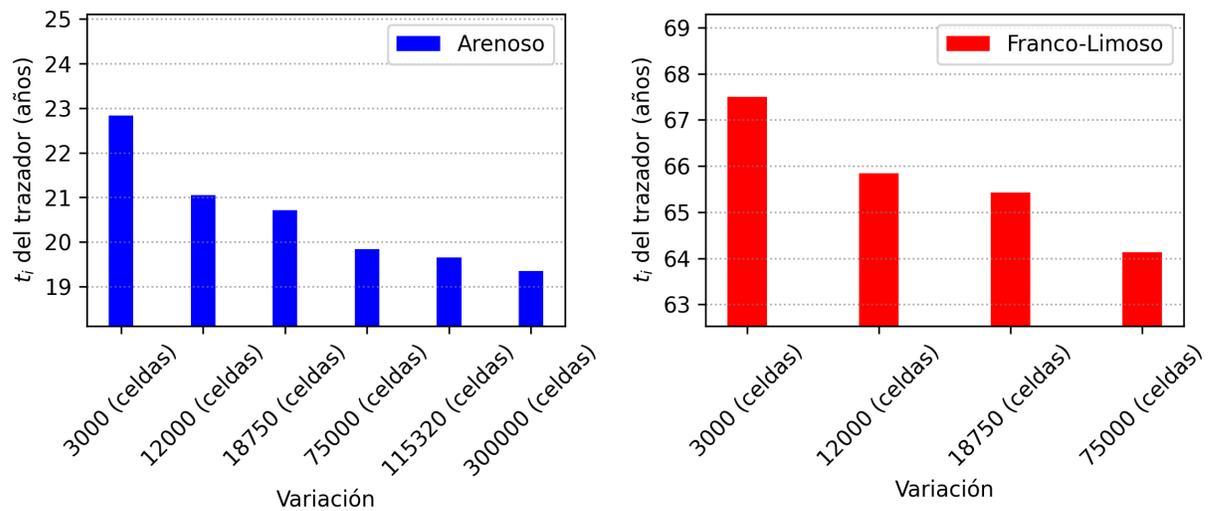


Figura C.18: Tiempos de llegada del trazador al estero en función de la variación de la cantidad de celdas en una malla en el Escenario 2.

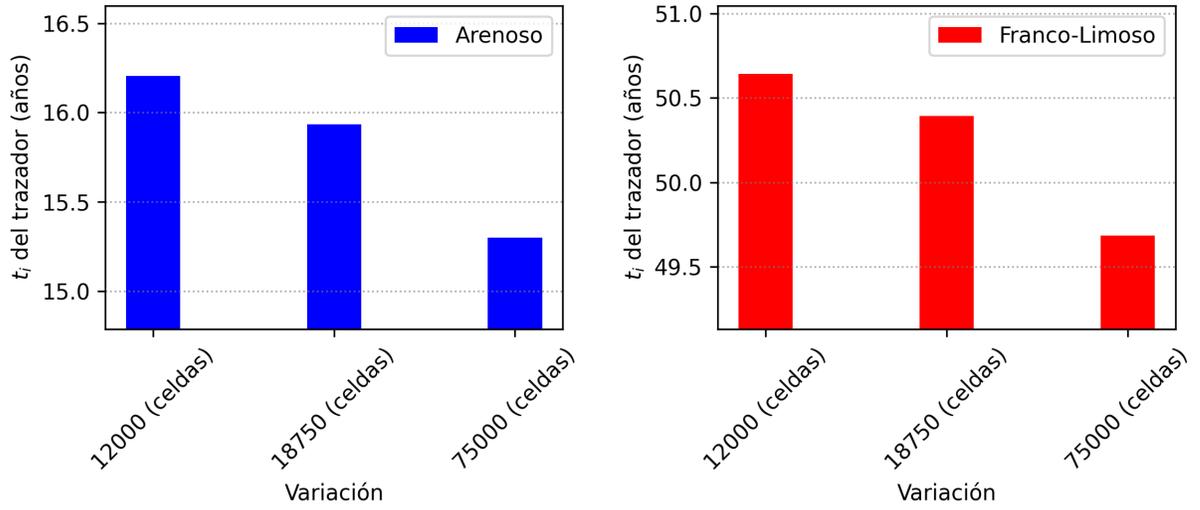


Figura C.19: Tiempos de llegada del trazador al estero en función de la variación de la cantidad de celdas en una malla en el Escenario 3.

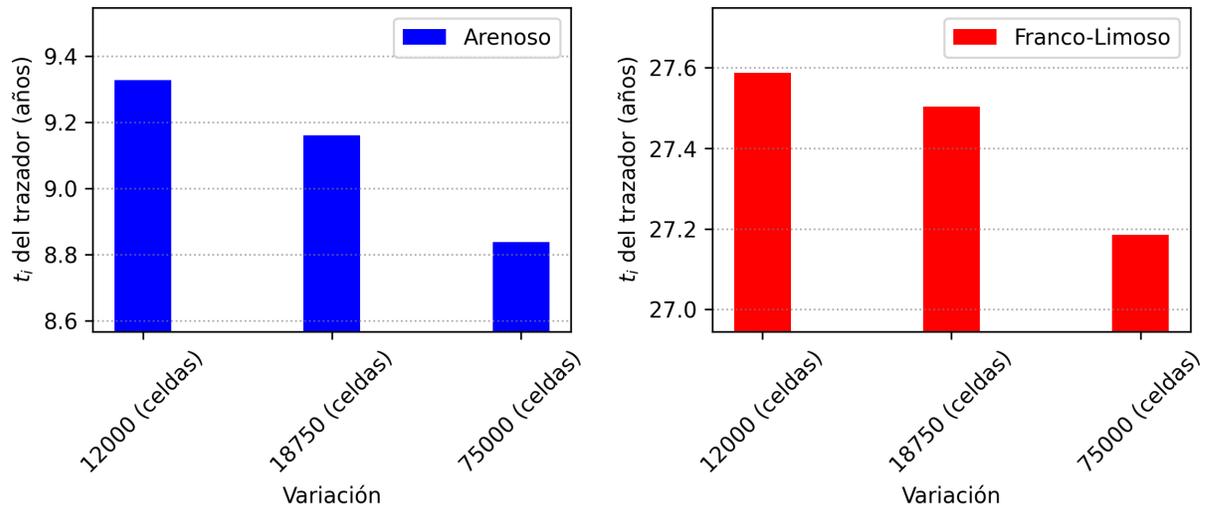


Figura C.20: Tiempos de llegada del trazador al estero en función de la variación de la cantidad de celdas en una malla en el Escenario 4.

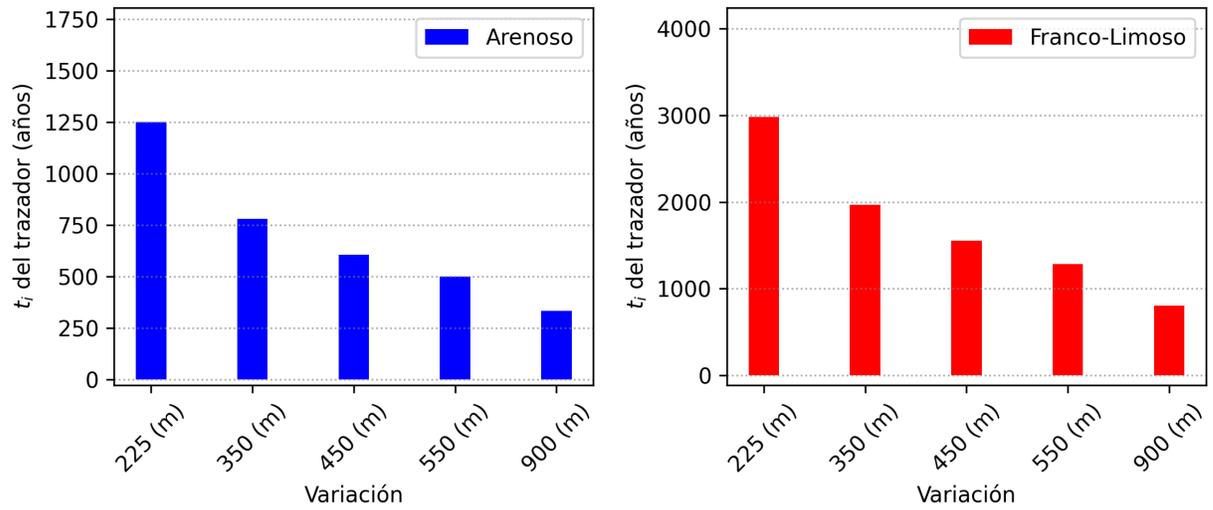


Figura C.21: Tiempos de llegada del trazador al estero en función de la variación del área de inyección del aporte hídrico en el Escenario 1.

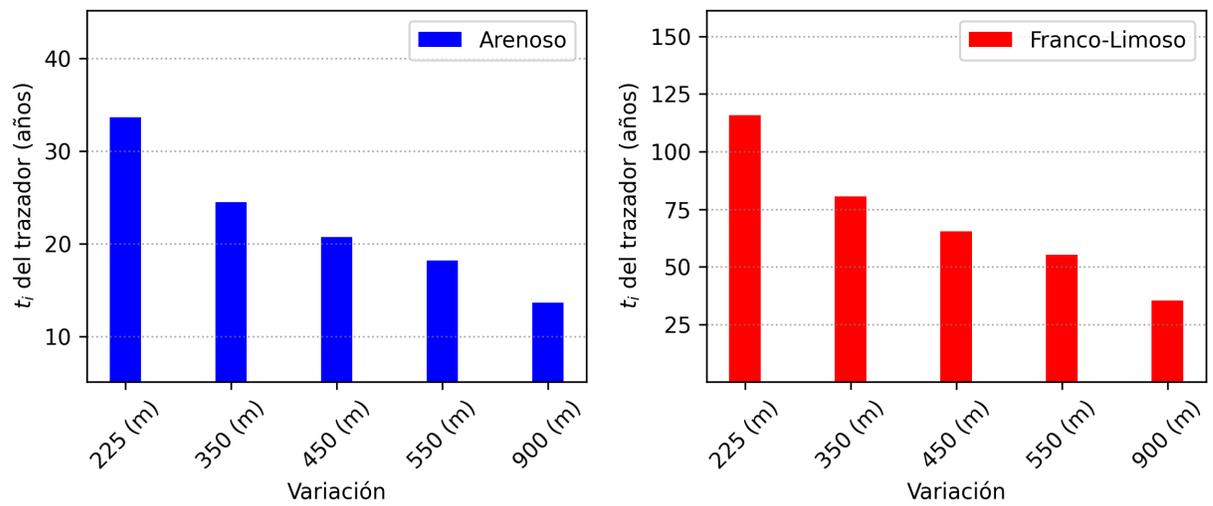


Figura C.22: Tiempos de llegada del trazador al estero en función de la variación del área de inyección del aporte hídrico en el Escenario 2.

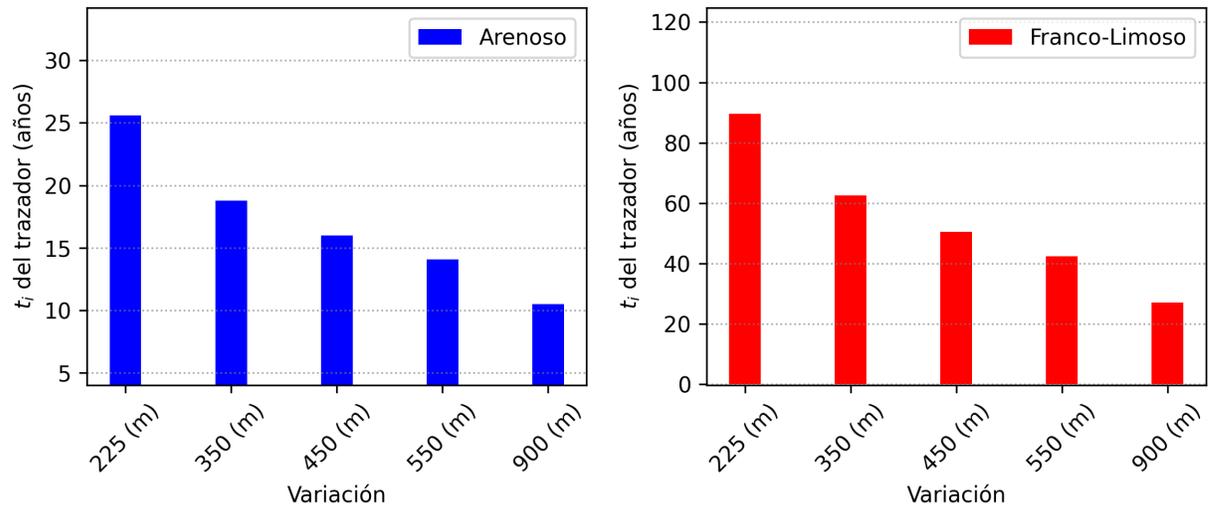


Figura C.23: Tiempos de llegada del trazador al estero en función de la variación del área de inyección del aporte hídrico en el Escenario 3.

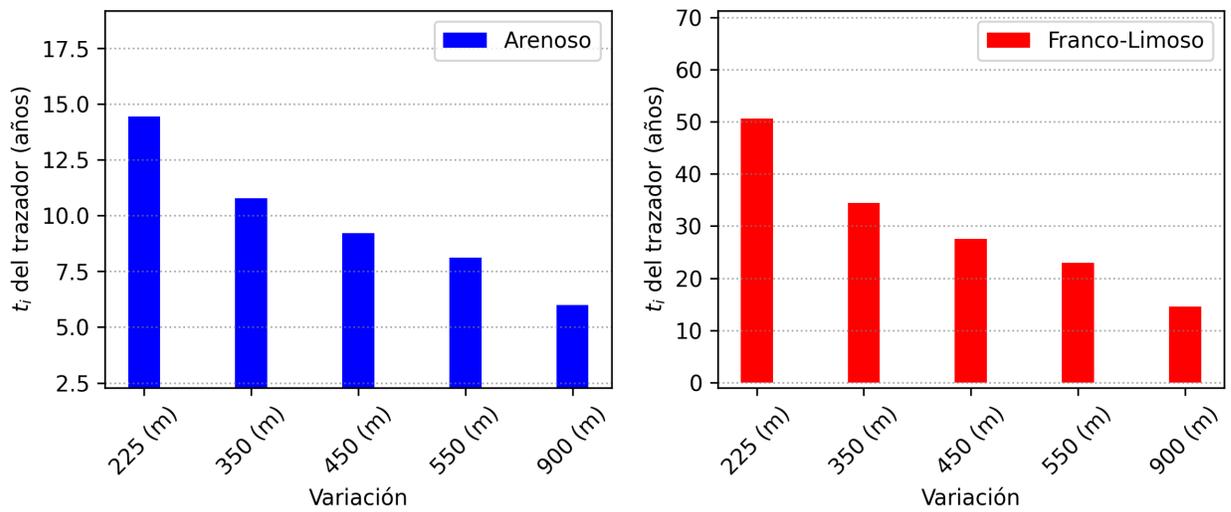


Figura C.24: Tiempos de llegada del trazador al estero en función de la variación del área de inyección del aporte hídrico en el Escenario 4.

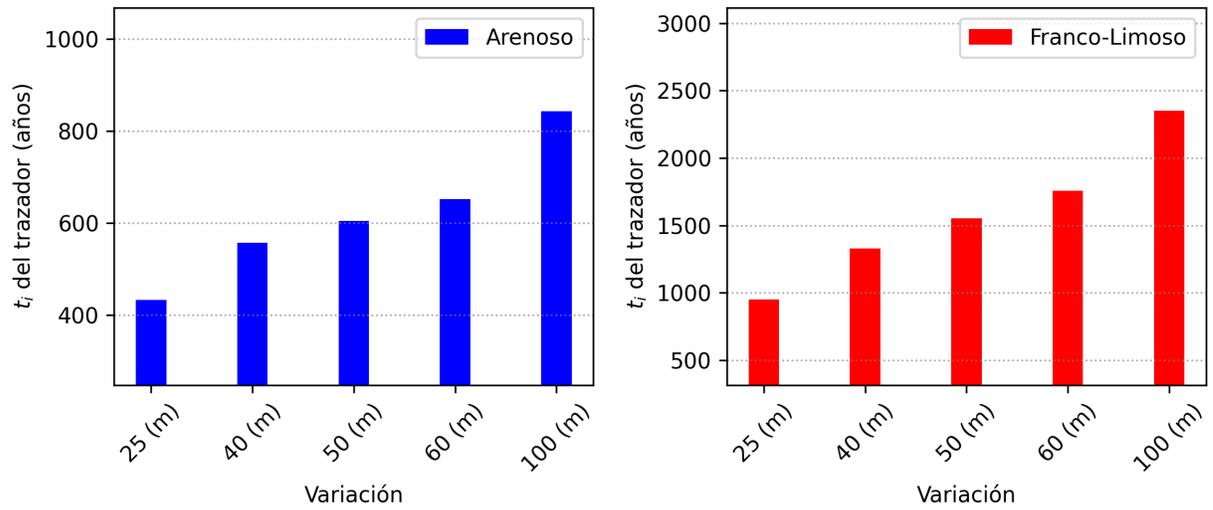


Figura C.25: Tiempos de llegada del trazador al estero en función de la variación de la profundidad del lecho poroso en el Escenario 1.

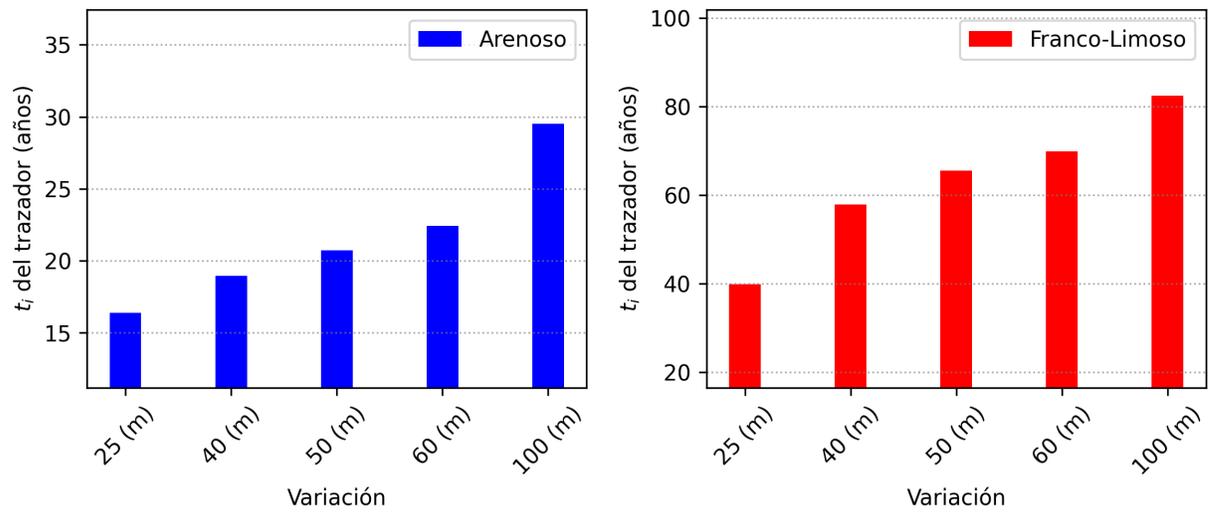


Figura C.26: Tiempos de llegada del trazador al estero en función de la variación de la profundidad del lecho poroso en el Escenario 2.

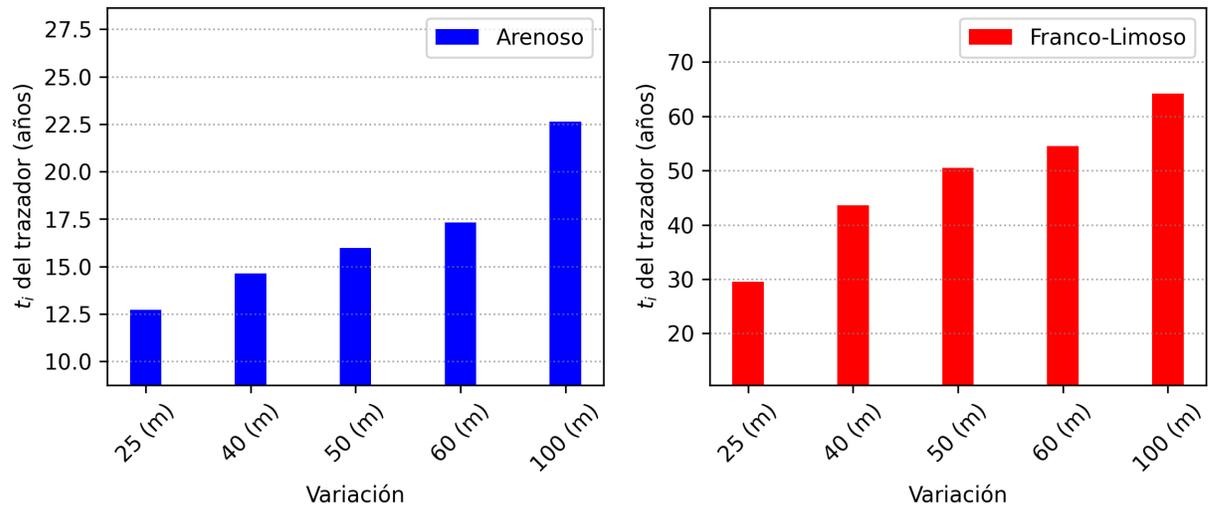


Figura C.27: Tiempos de llegada del trazador al estero en función de la variación de la profundidad del lecho poroso en el Escenario 3.

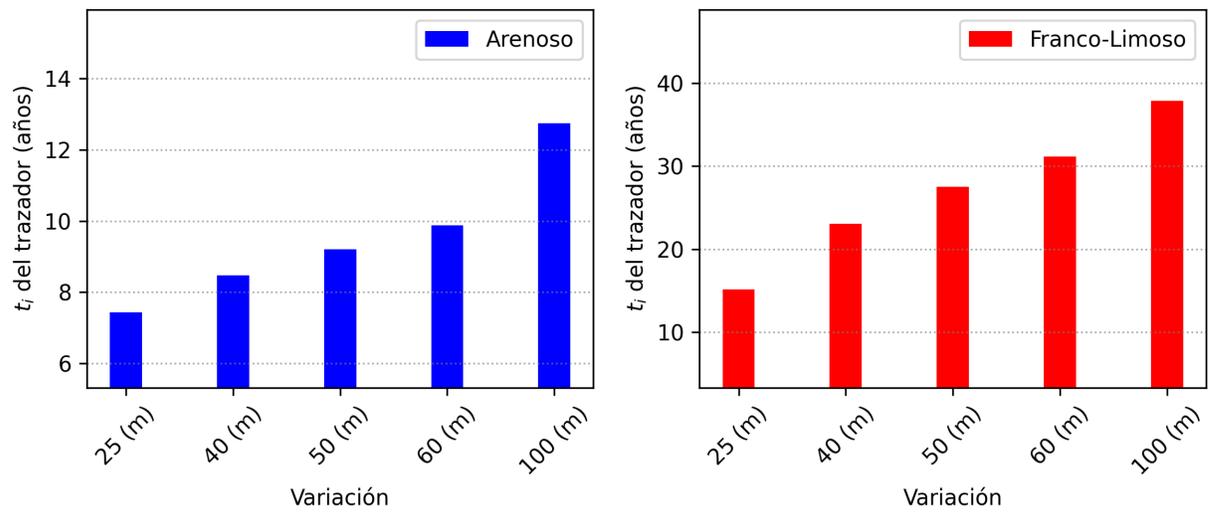


Figura C.28: Tiempos de llegada del trazador al estero en función de la variación de la profundidad del lecho poroso en el Escenario 4.

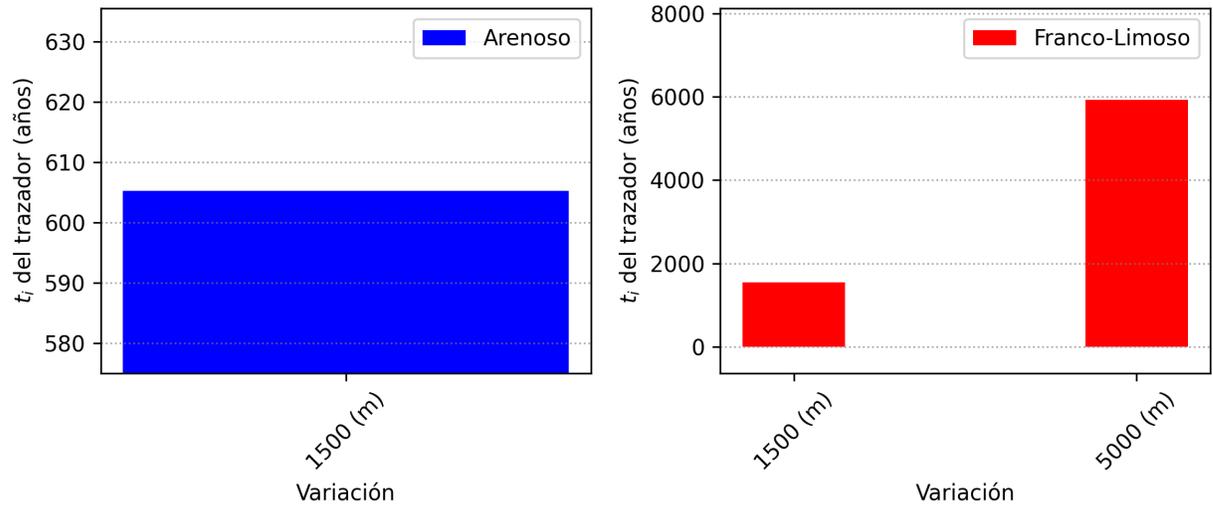


Figura C.29: Tiempos de llegada del trazador al estero en función de la variación del largo del lecho poroso en el Escenario 1.

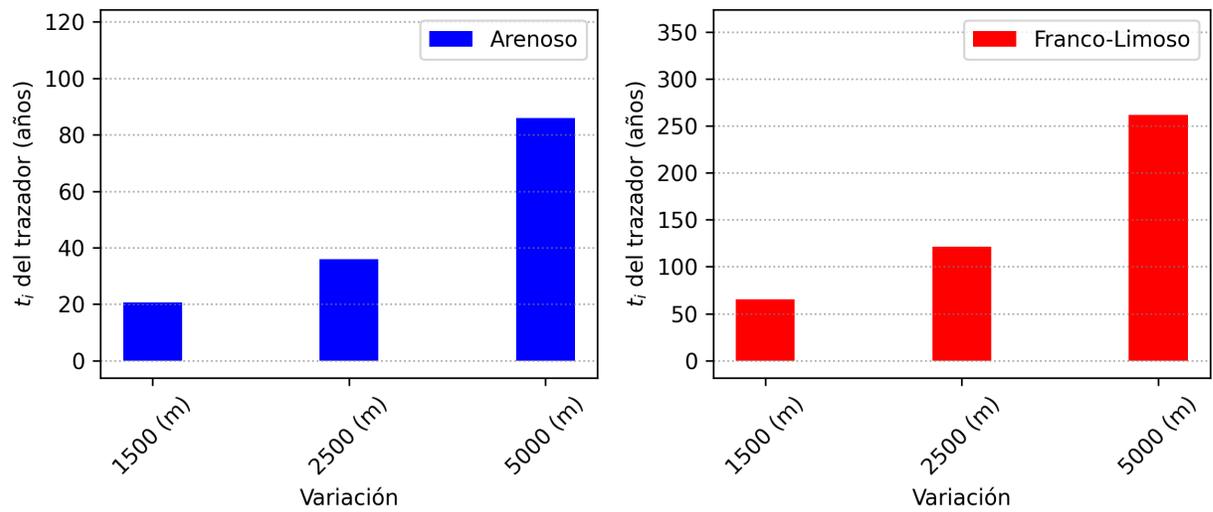


Figura C.30: Tiempos de llegada del trazador al estero en función de la variación del largo del lecho poroso en el Escenario 2.

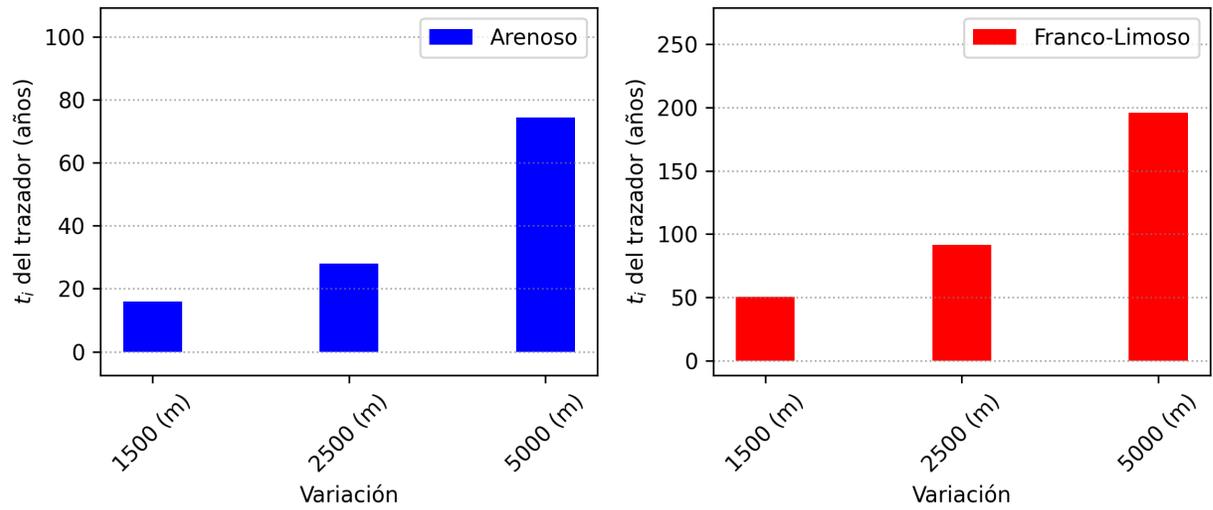


Figura C.31: Tiempos de llegada del trazador al estero en función de la variación del largo del lecho poroso en el Escenario 3.

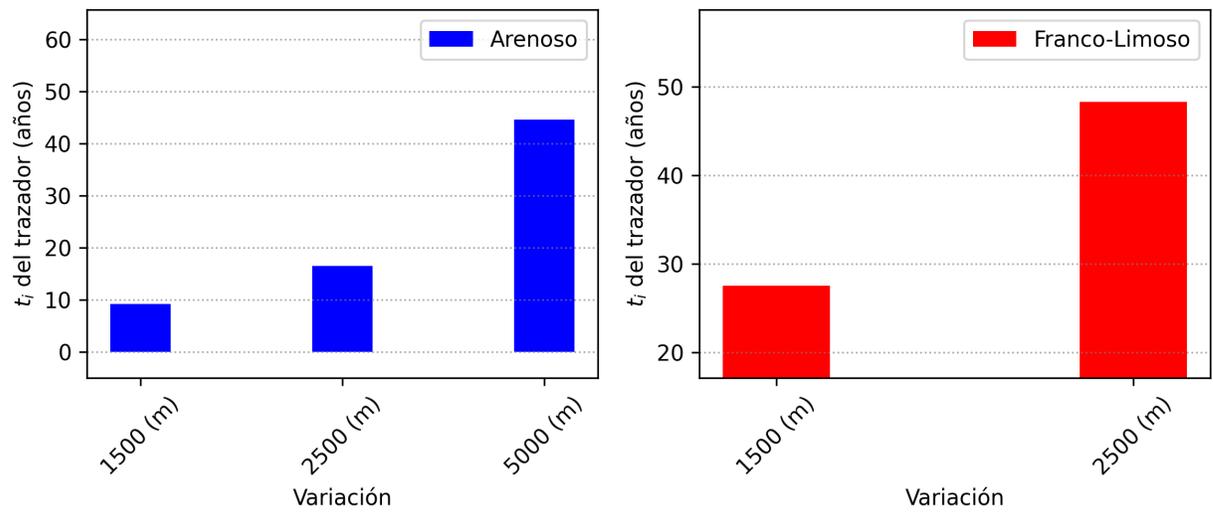


Figura C.32: Tiempos de llegada del trazador al estero en función de la variación del largo del lecho poroso en el Escenario 4.

C.1.4. Velocidades del trazador en las zonas ubicadas en perpendicular del fondo

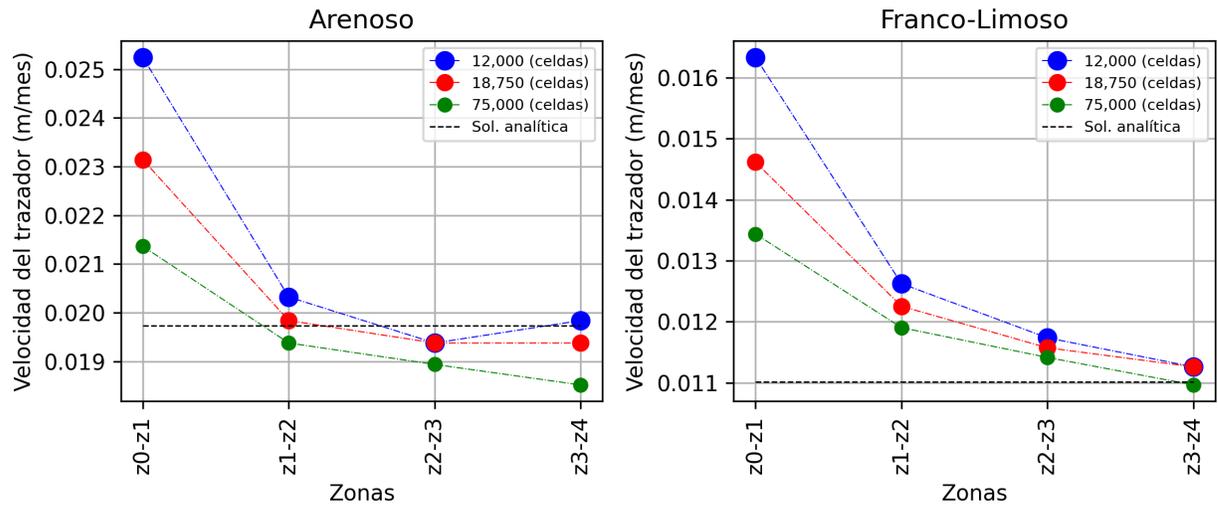


Figura C.33: Velocidades del trazador en función de las distintas zonas ubicadas en perpendicular al fondo del lecho y según la cantidad de celdas utilizadas en la malla en el Escenario 1.

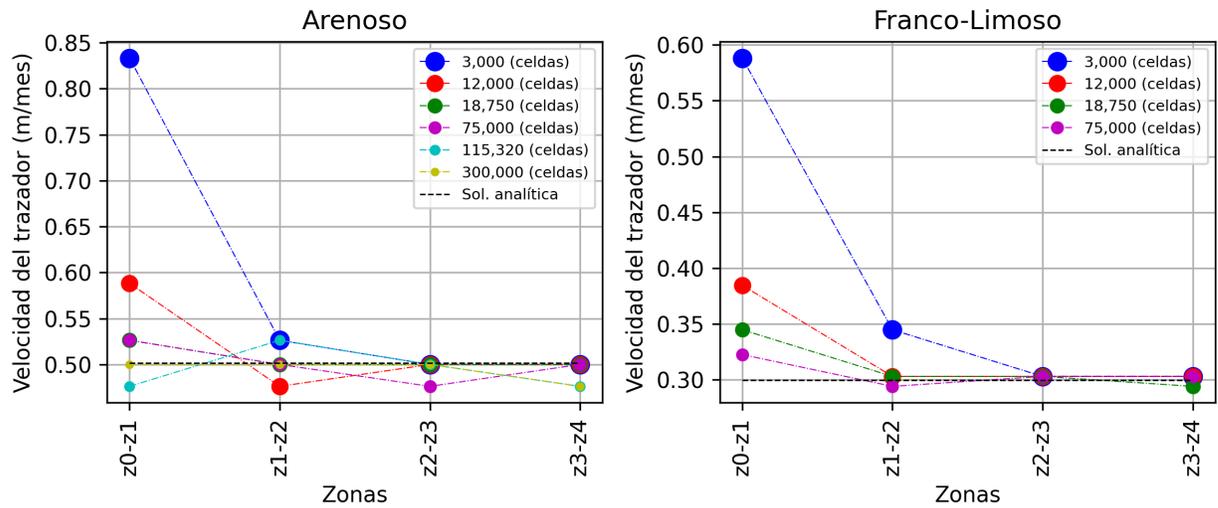


Figura C.34: Velocidades del trazador en función de las distintas zonas ubicadas en perpendicular al fondo del lecho y según la cantidad de celdas utilizadas en la malla en el Escenario 2.

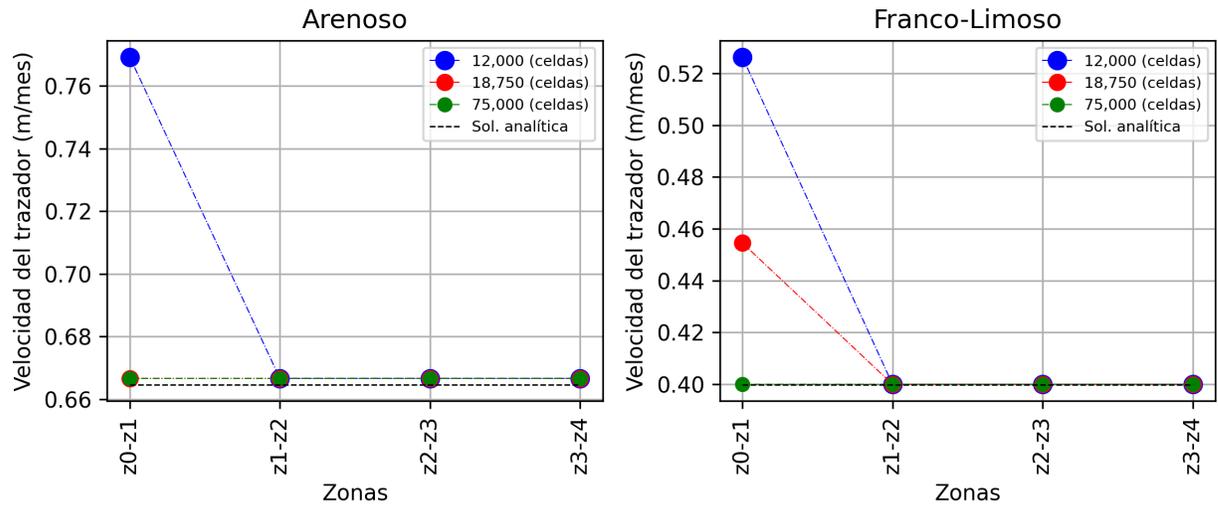


Figura C.35: Velocidades del trazador en función de las distintas zonas ubicadas en perpendicular al fondo del lecho y según la cantidad de celdas utilizadas en la malla en el Escenario 3.

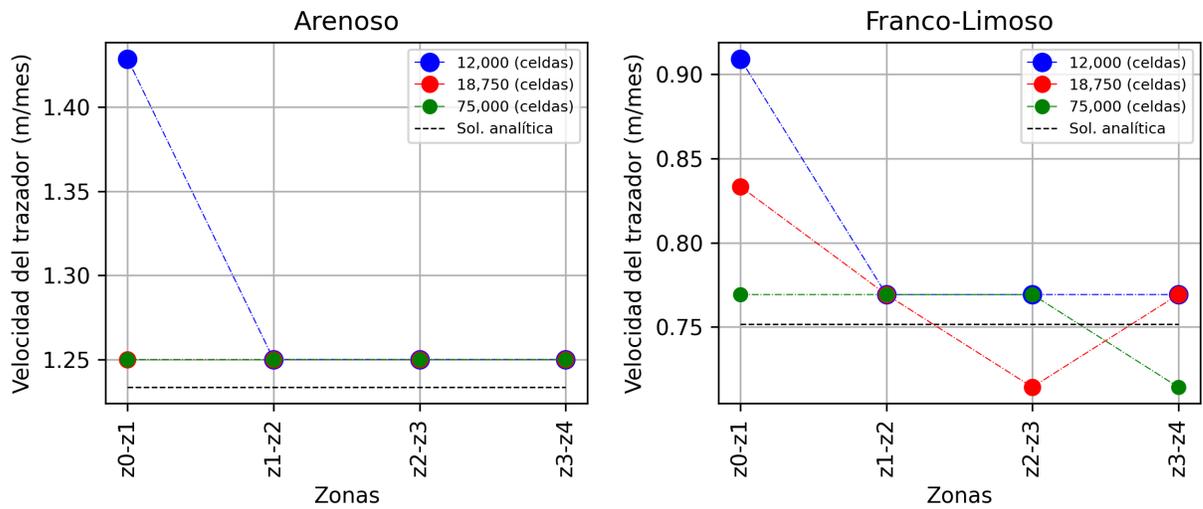


Figura C.36: Velocidades del trazador en función de las distintas zonas ubicadas en perpendicular al fondo del lecho y según la cantidad de celdas utilizadas en la malla en el Escenario 4.

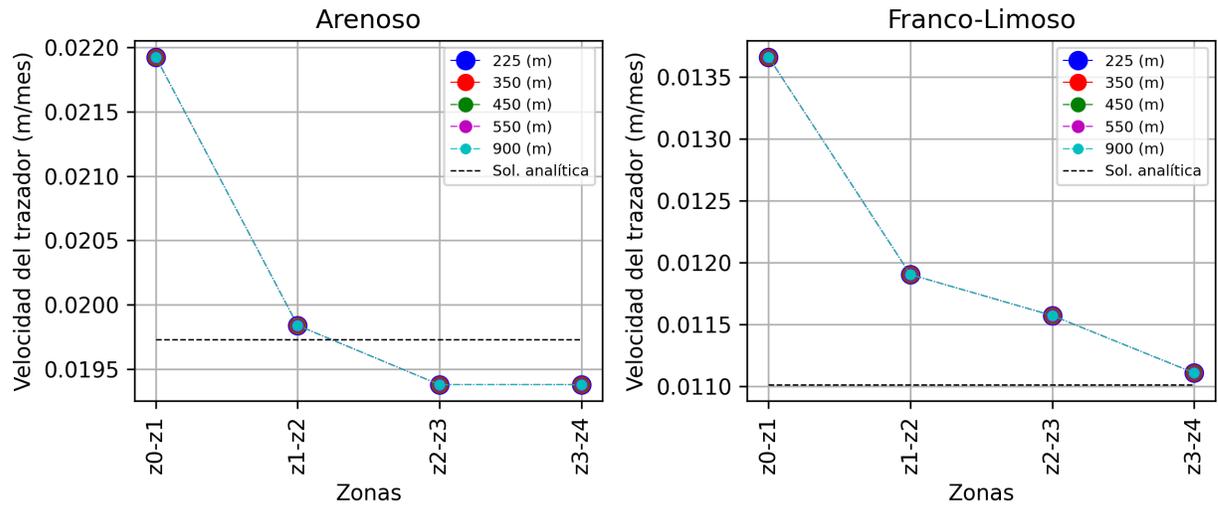


Figura C.37: Velocidades del trazador en función de las distintas zonas ubicadas en perpendicular al fondo del lecho y según el área de inyección del aporte hídrico en el Escenario 1.

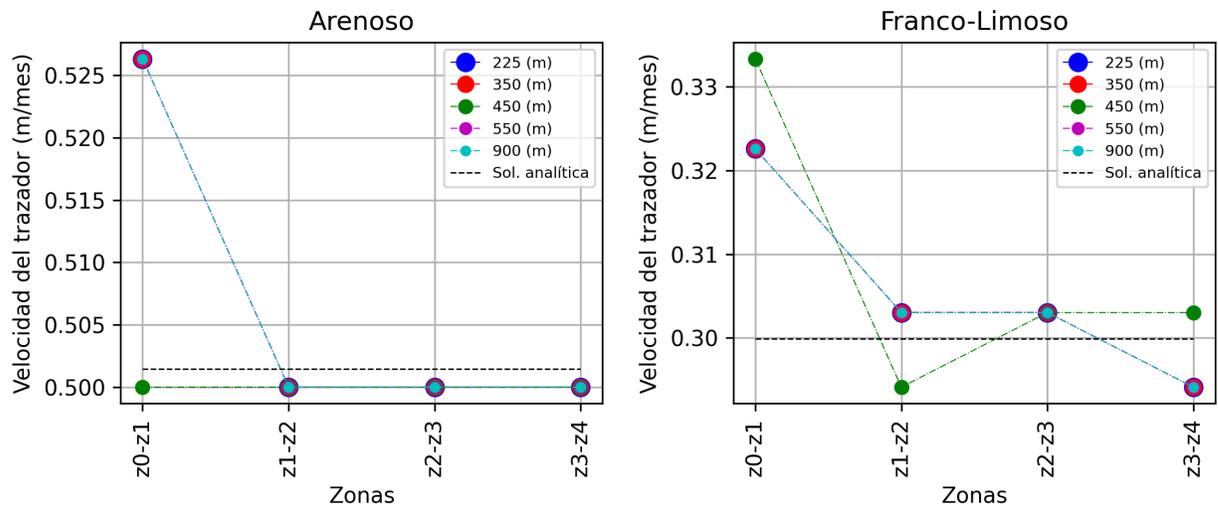


Figura C.38: Velocidades del trazador en función de las distintas zonas ubicadas en perpendicular al fondo del lecho y según el área de inyección del aporte hídrico en el Escenario 2.

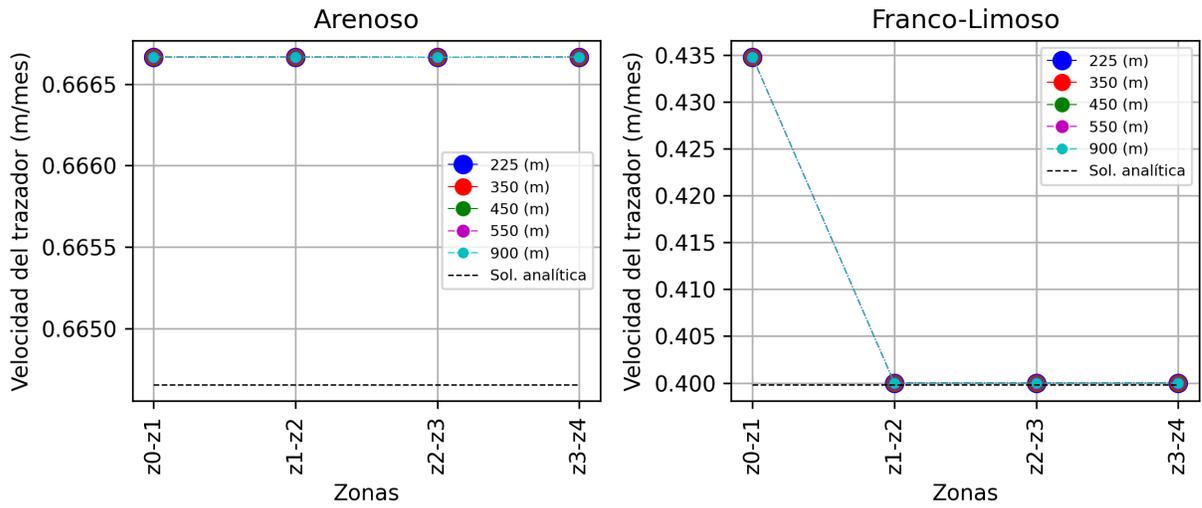


Figura C.39: Velocidades del trazador en función de las distintas zonas ubicadas en perpendicular al fondo del lecho y según el área de inyección del aporte hídrico en el Escenario 3.

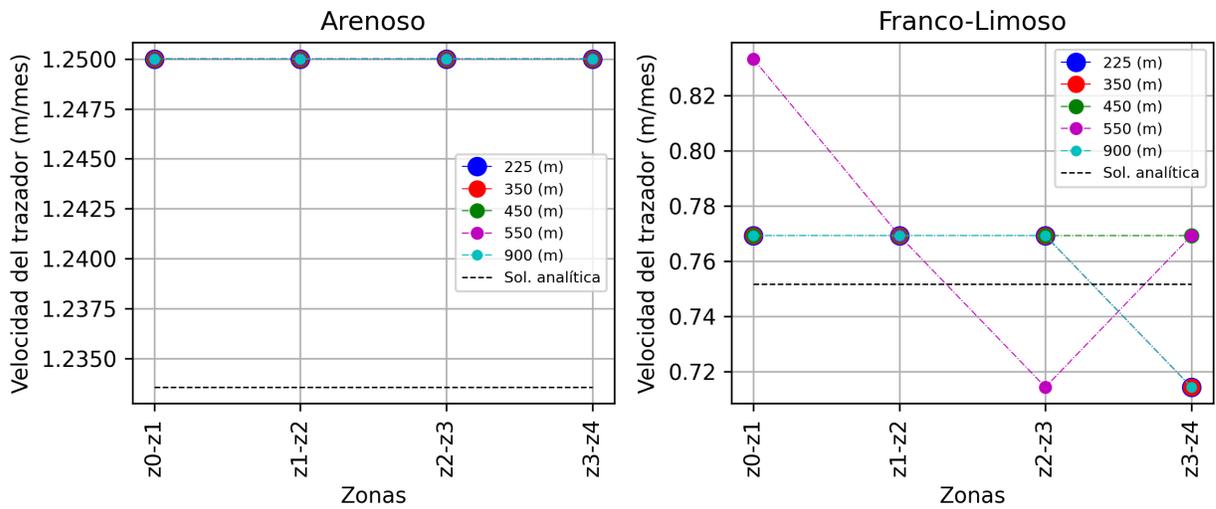


Figura C.40: Velocidades del trazador en función de las distintas zonas ubicadas en perpendicular al fondo del lecho y según el área de inyección del aporte hídrico en el Escenario 4.

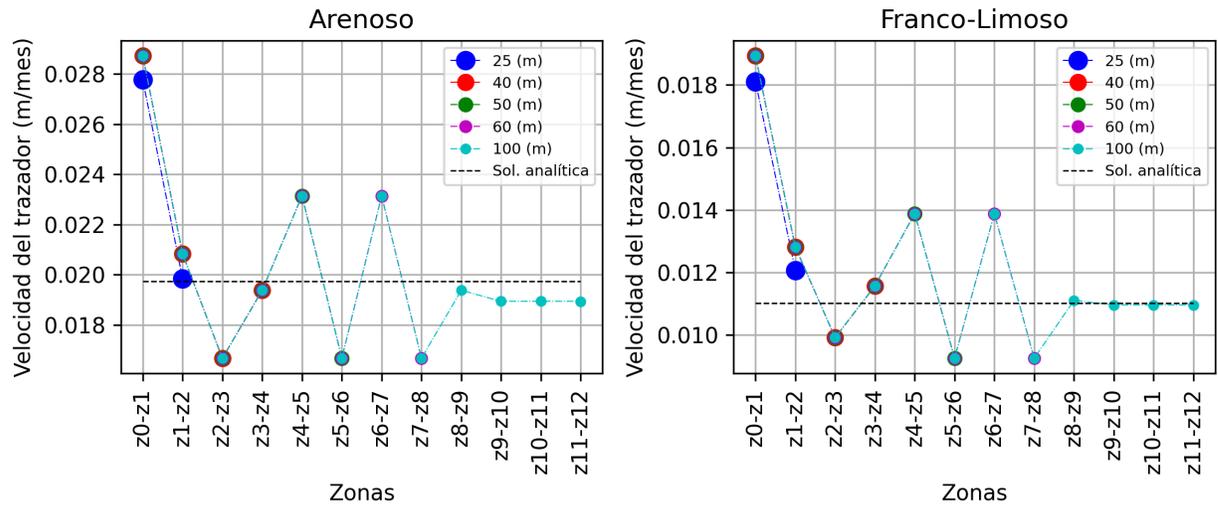


Figura C.41: Velocidades del trazador en función de las distintas zonas ubicadas en perpendicular al fondo del lecho y según la profundidad del lecho poroso en el Escenario 1.

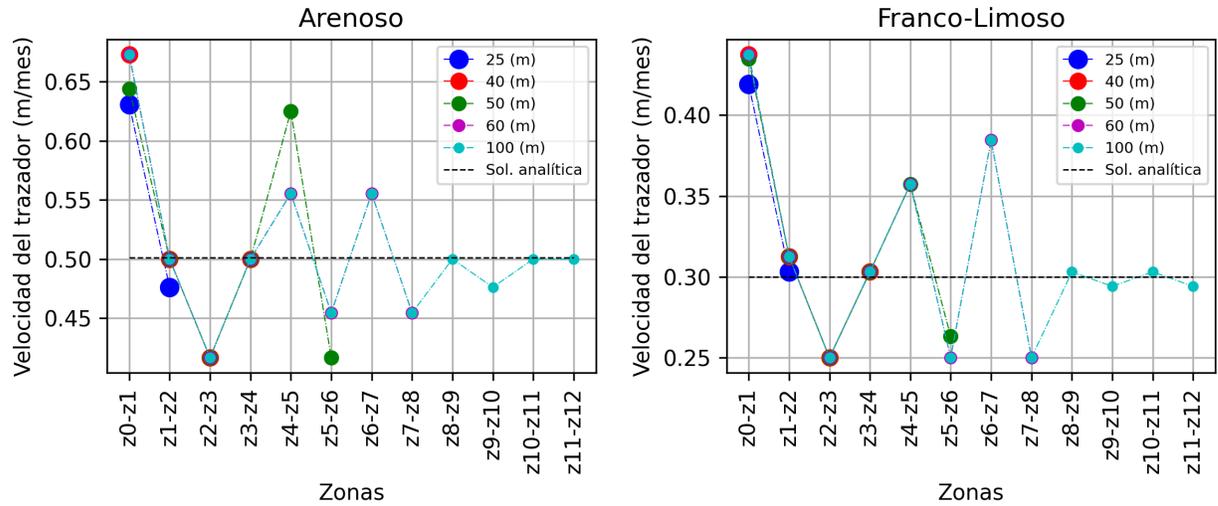


Figura C.42: Velocidades del trazador en función de las distintas zonas ubicadas en perpendicular al fondo del lecho y según la profundidad del lecho poroso en el Escenario 2.

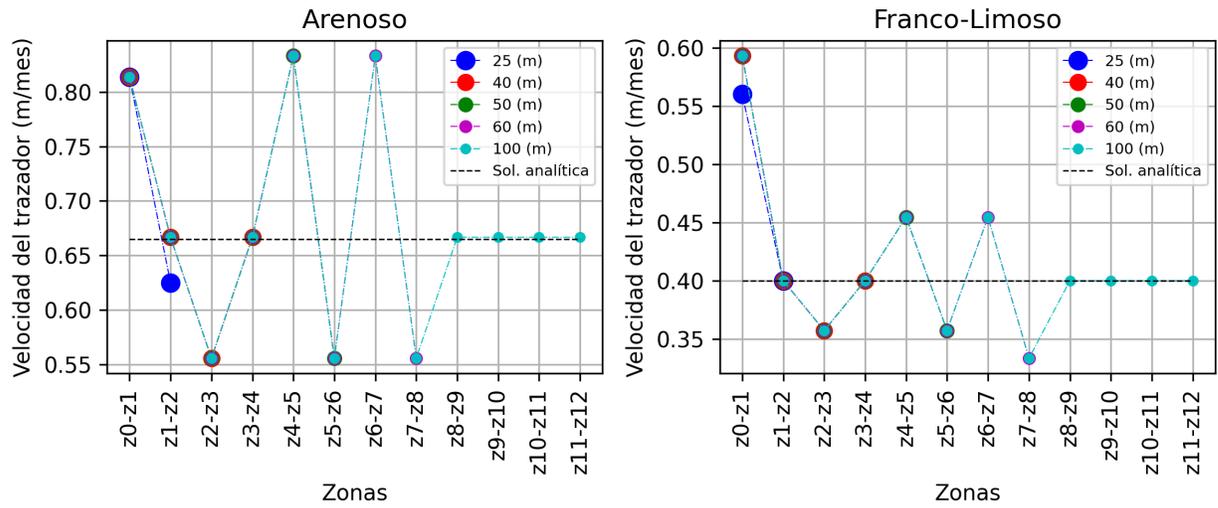


Figura C.43: Velocidades del trazador en función de las distintas zonas ubicadas en perpendicular al fondo del lecho y según la profundidad del lecho poroso en el Escenario 3.

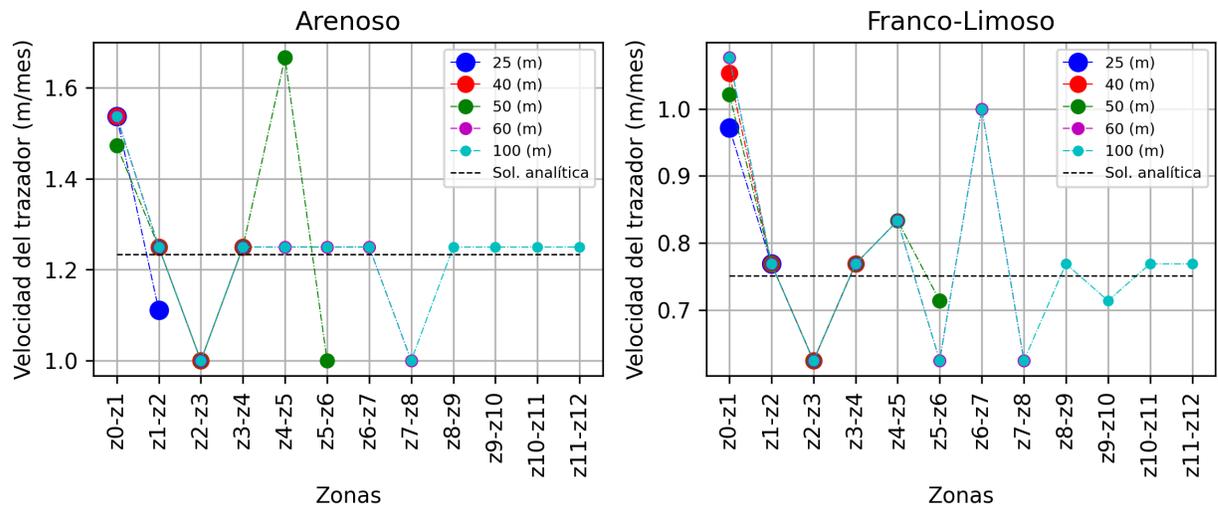


Figura C.44: Velocidades del trazador en función de las distintas zonas ubicadas en perpendicular al fondo del lecho y según la profundidad del lecho poroso en el Escenario 4.

### C.1.5. Velocidades del trazador en las zonas ubicadas en paralelo del fondo

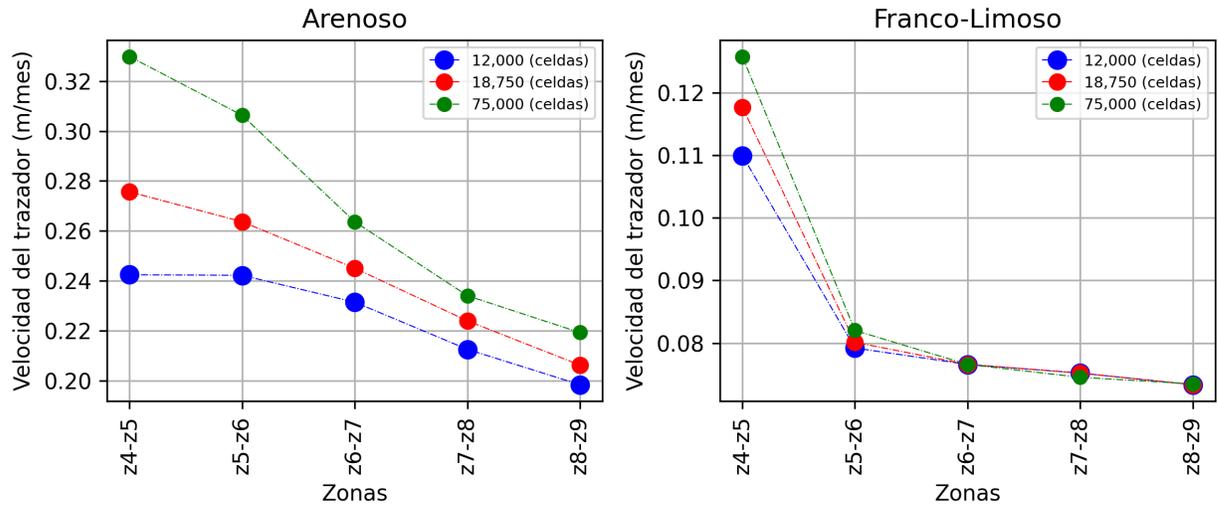


Figura C.45: Velocidades del trazador en función de las distintas zonas ubicadas en paralelo al fondo del lecho y según la cantidad de celdas utilizadas en la malla en el Escenario 1.

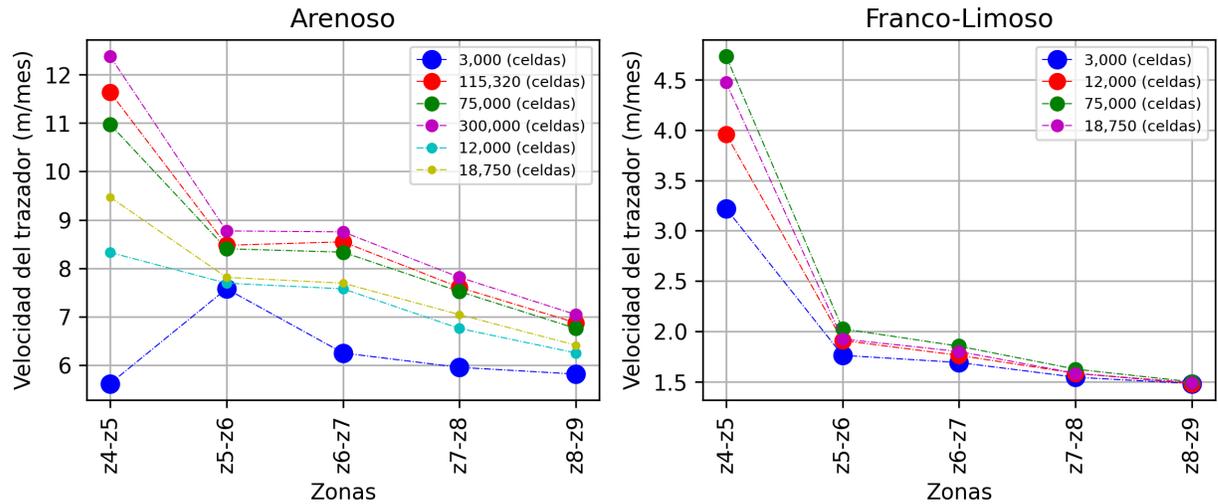


Figura C.46: Velocidades del trazador en función de las distintas zonas ubicadas en paralelo al fondo del lecho y según la cantidad de celdas utilizadas en la malla en el Escenario 2.

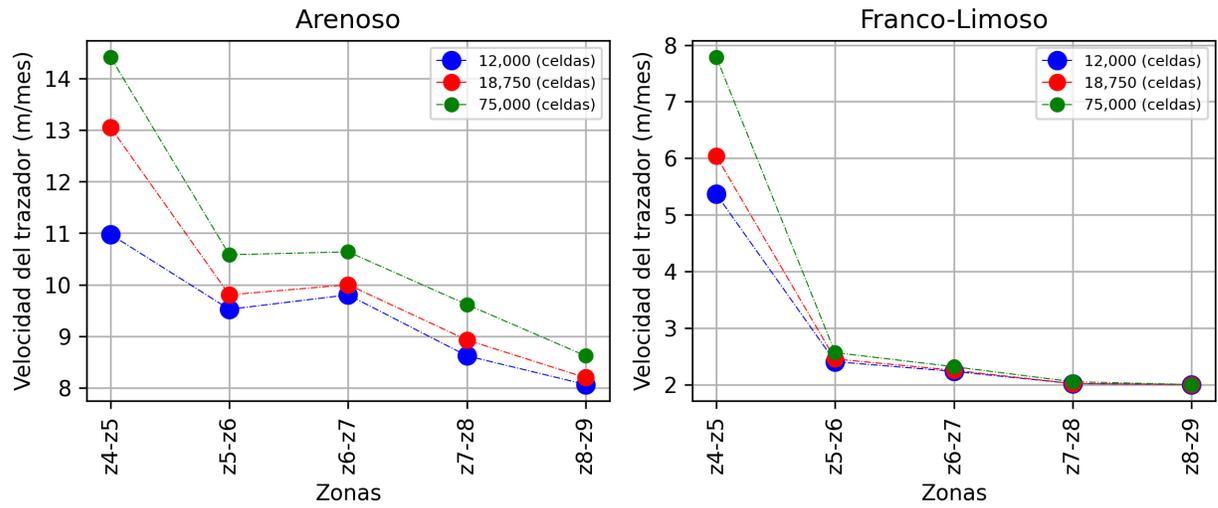


Figura C.47: Velocidades del trazador en función de las distintas zonas ubicadas en paralelo al fondo del lecho y según la cantidad de celdas utilizadas en la malla en el Escenario 3.

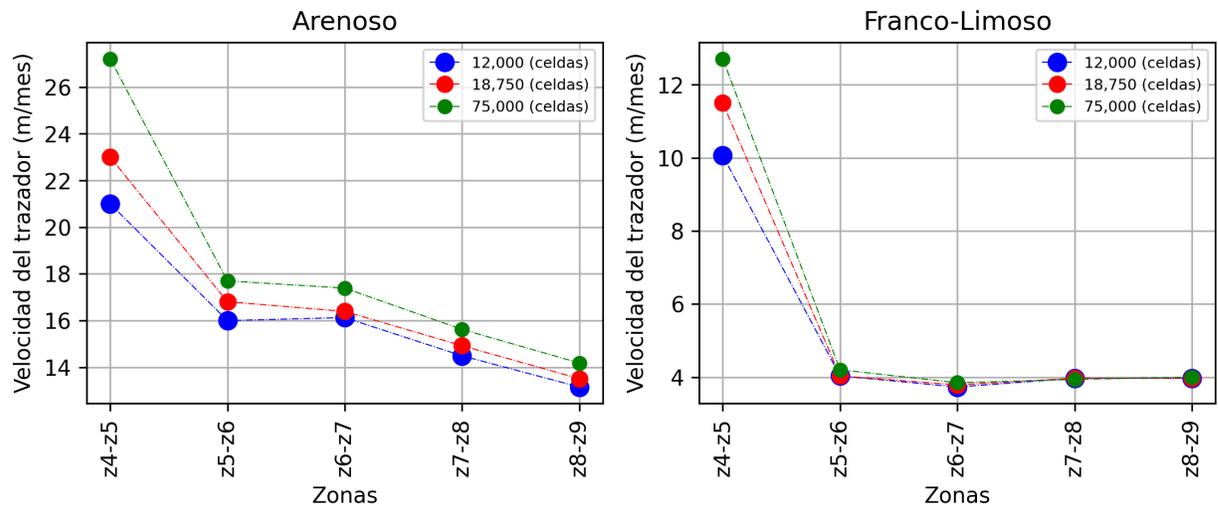


Figura C.48: Velocidades del trazador en función de las distintas zonas ubicadas en paralelo al fondo del lecho y según la cantidad de celdas utilizadas en la malla en el Escenario 4.

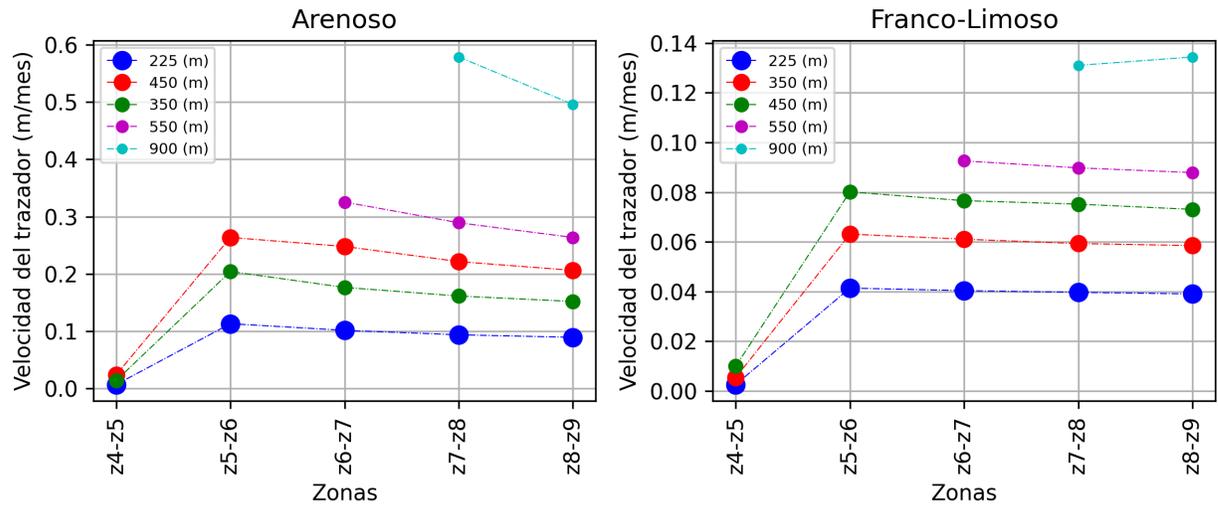


Figura C.49: Velocidades del trazador en función de las distintas zonas ubicadas en paralelo al fondo del lecho y según el área de inyección del aporte hídrico en el Escenario 1.

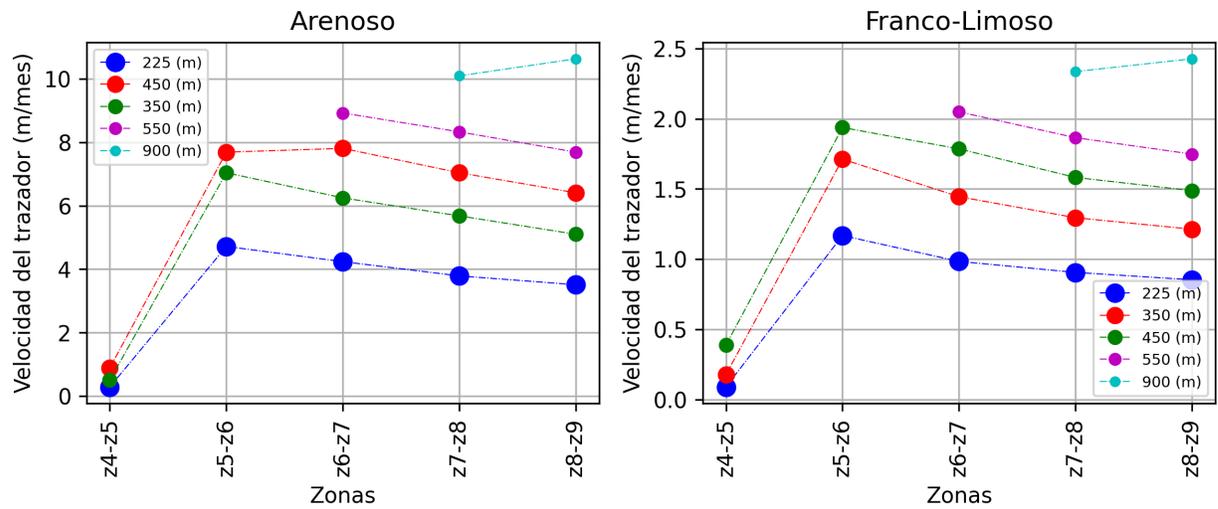


Figura C.50: Velocidades del trazador en función de las distintas zonas ubicadas en paralelo al fondo del lecho y según el área de inyección del aporte hídrico en el Escenario 2.

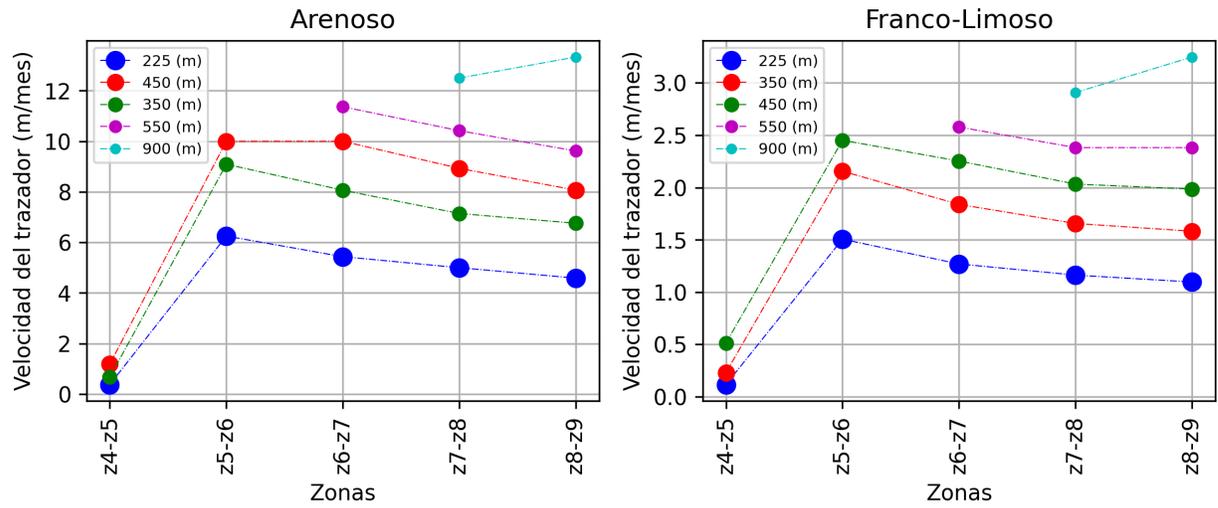


Figura C.51: Velocidades del trazador en función de las distintas zonas ubicadas en paralelo al fondo del lecho y según el área de inyección del aporte hídrico en el Escenario 3.

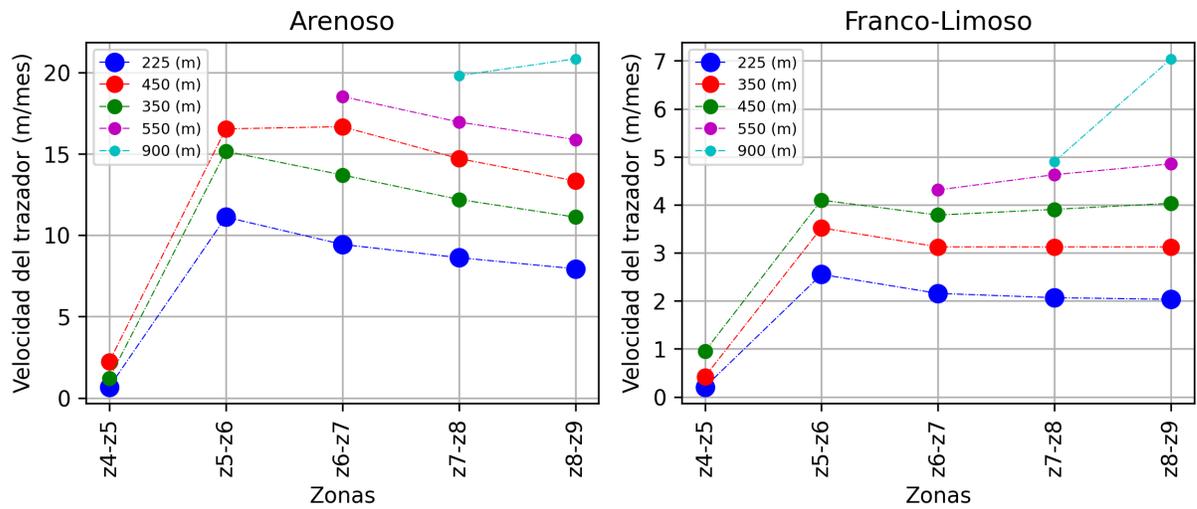


Figura C.52: Velocidades del trazador en función de las distintas zonas ubicadas en paralelo al fondo del lecho y según el área de inyección del aporte hídrico en el Escenario 4.

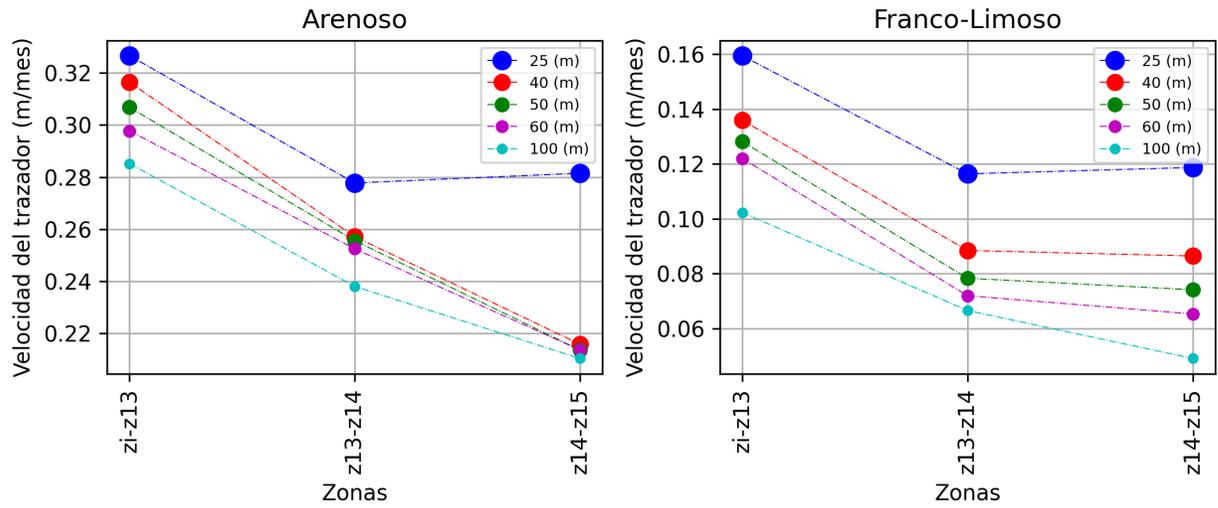


Figura C.53: Velocidades del trazador en función de las distintas zonas ubicadas en paralelo al fondo del lecho y según la profundidad del lecho poroso en el Escenario 1.

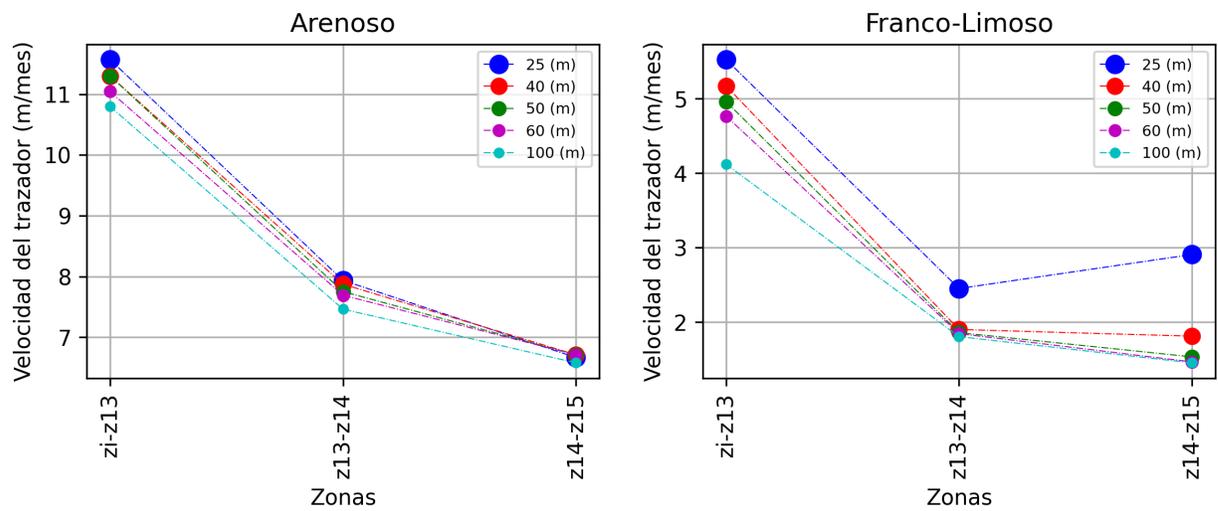


Figura C.54: Velocidades del trazador en función de las distintas zonas ubicadas en paralelo al fondo del lecho y según la profundidad del lecho poroso en el Escenario 2.

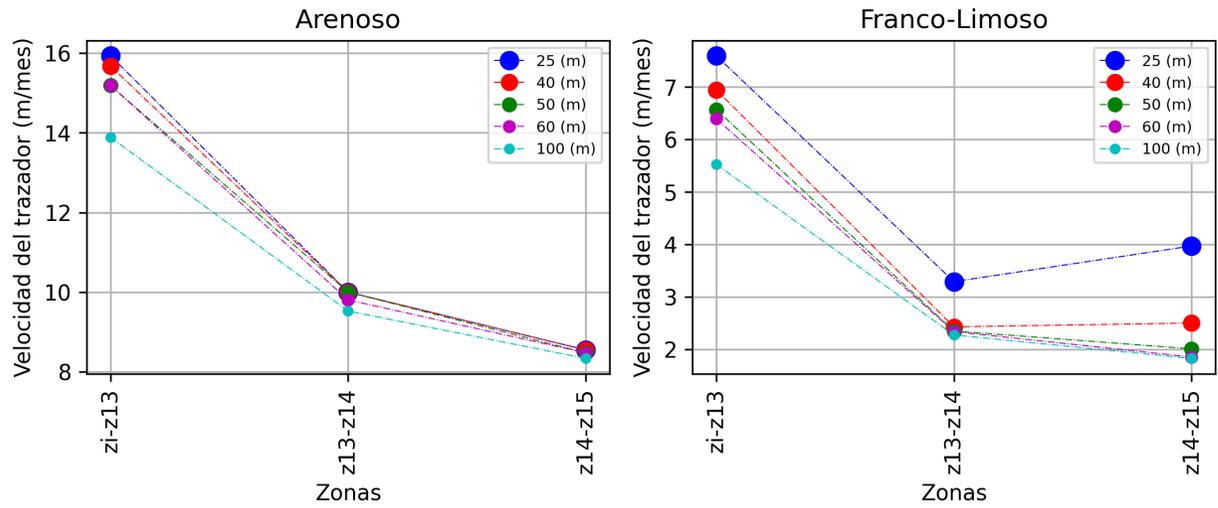


Figura C.55: Velocidades del trazador en función de las distintas zonas ubicadas en paralelo al fondo del lecho y según la profundidad del lecho poroso en el Escenario 3.

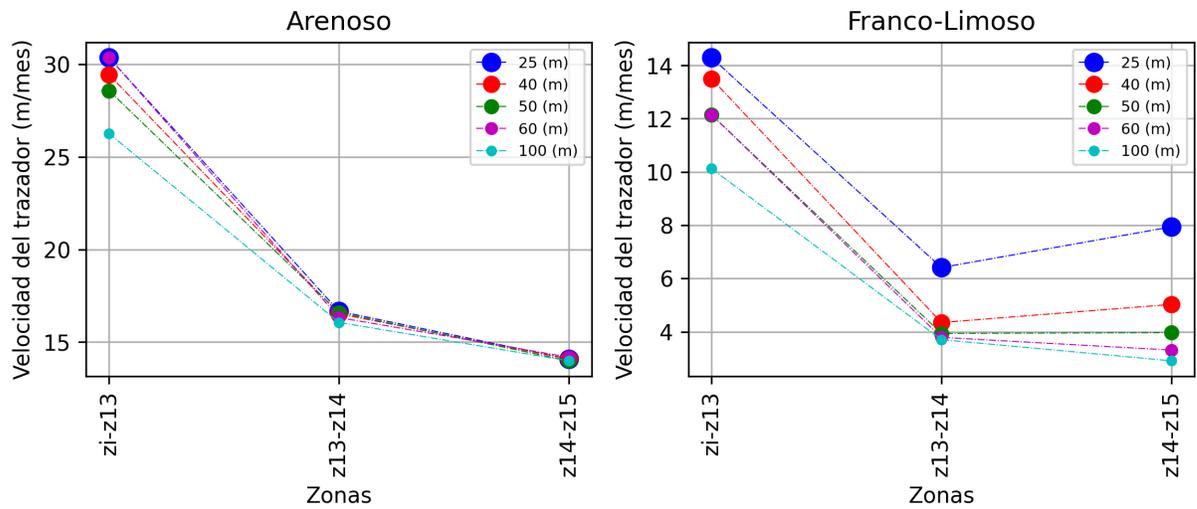


Figura C.56: Velocidades del trazador en función de las distintas zonas ubicadas en paralelo al fondo del lecho y según la profundidad del lecho poroso en el Escenario 4.

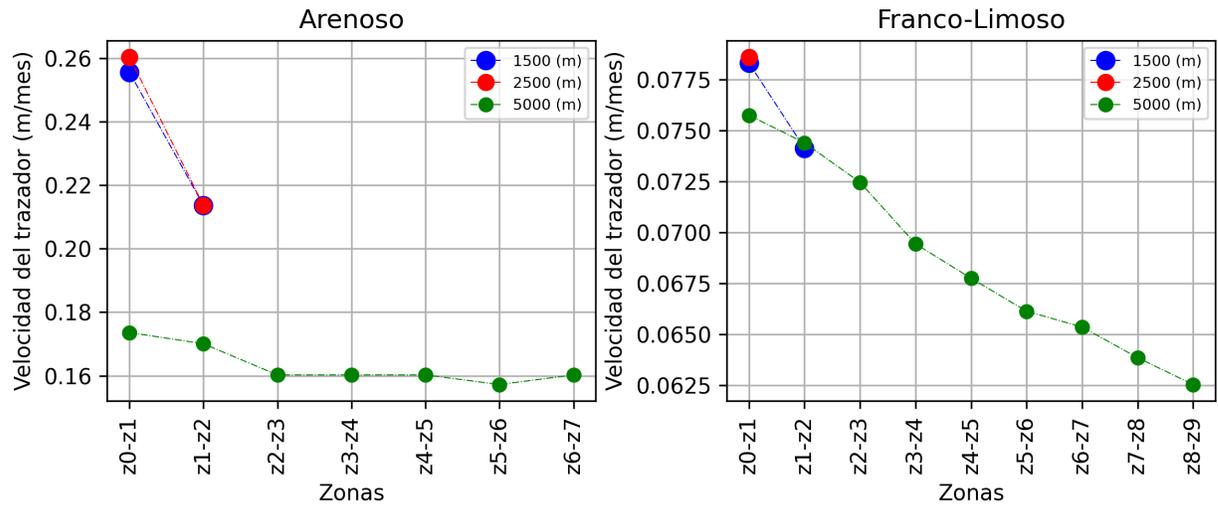


Figura C.57: Velocidades del trazador en función de las distintas zonas ubicadas en paralelo al fondo del lecho y según el largo del lecho poroso en el Escenario 1.

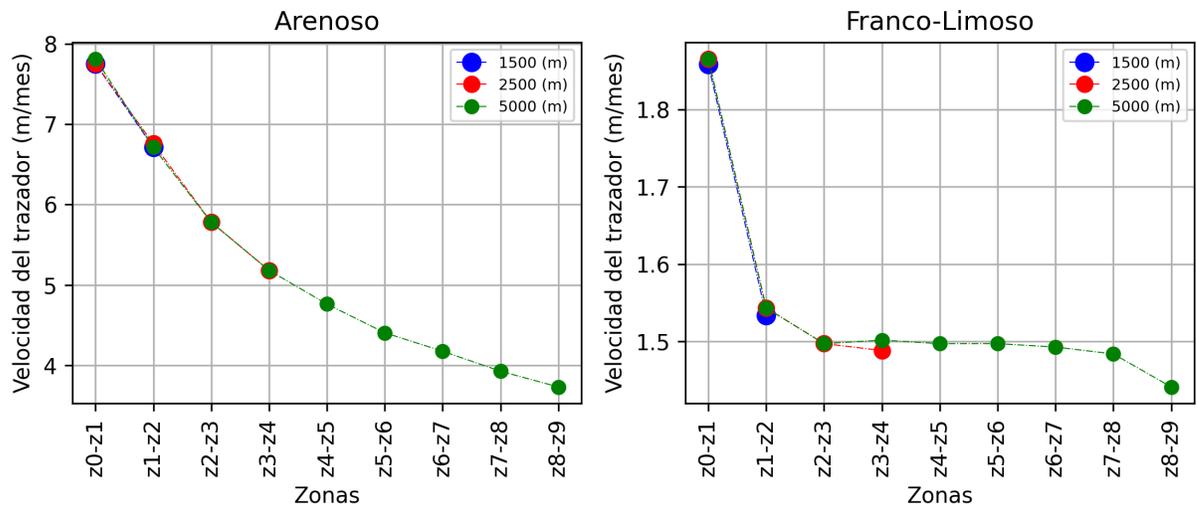


Figura C.58: Velocidades del trazador en función de las distintas zonas ubicadas en paralelo al fondo del lecho y según el largo del lecho poroso en el Escenario 2.

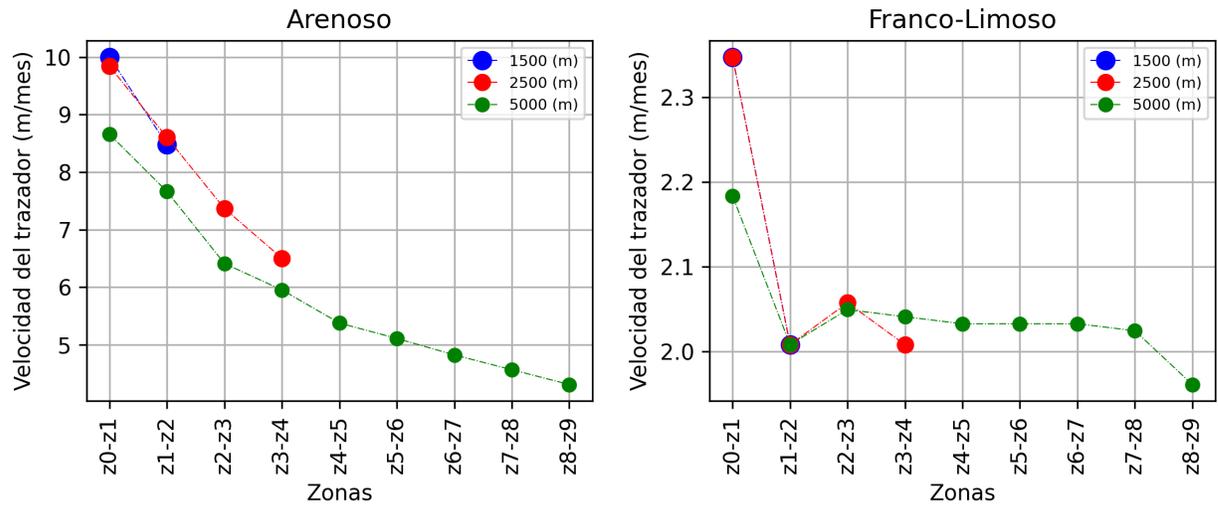


Figura C.59: Velocidades del trazador en función de las distintas zonas ubicadas en paralelo al fondo del lecho y según el largo del lecho poroso en el Escenario 3.

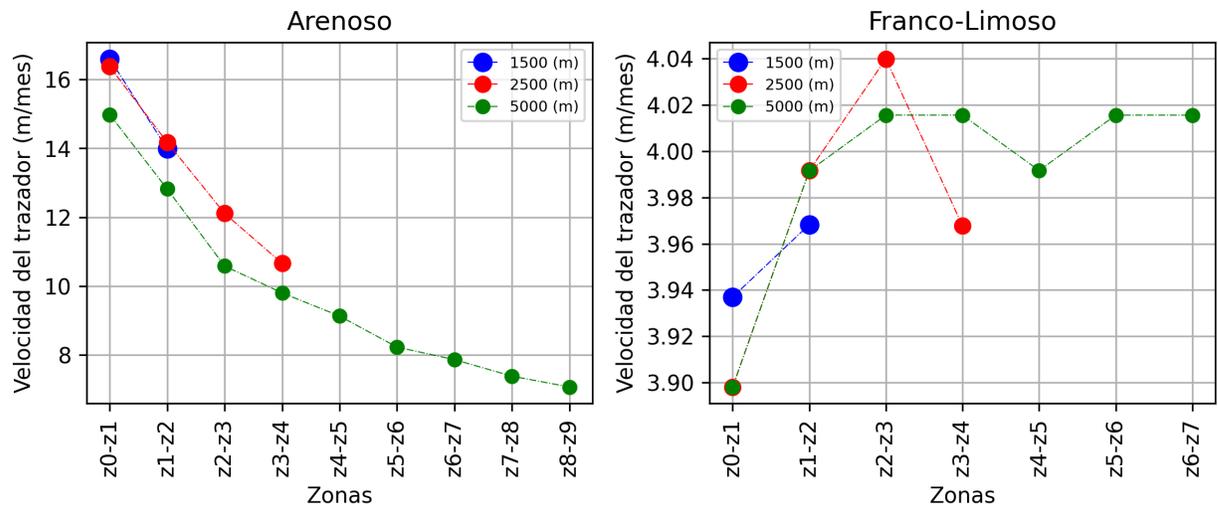
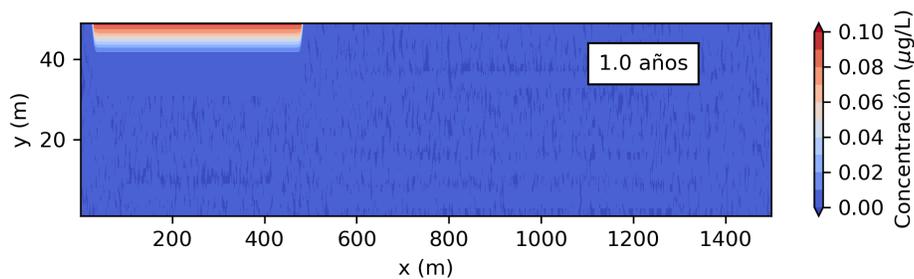


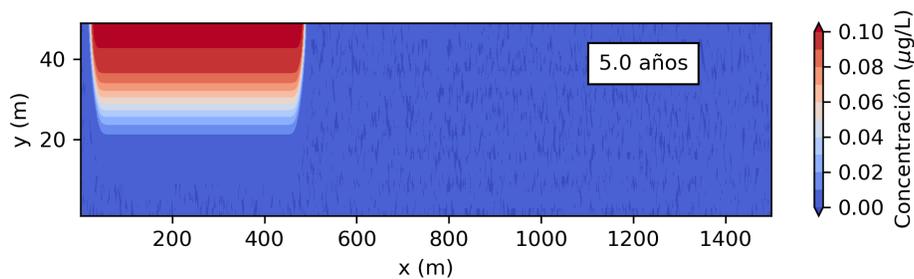
Figura C.60: Velocidades del trazador en función de las distintas zonas ubicadas en paralelo al fondo del lecho y según el largo del lecho poroso en el Escenario 4.

## C.2. Gravedad Inclinada (GI)

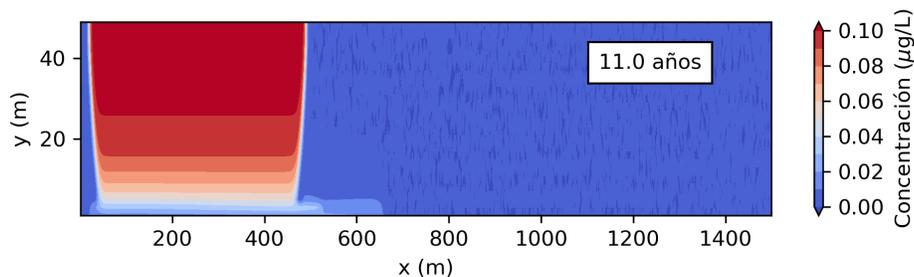
### C.2.1. Concentración del trazador en función de su posición en el lecho



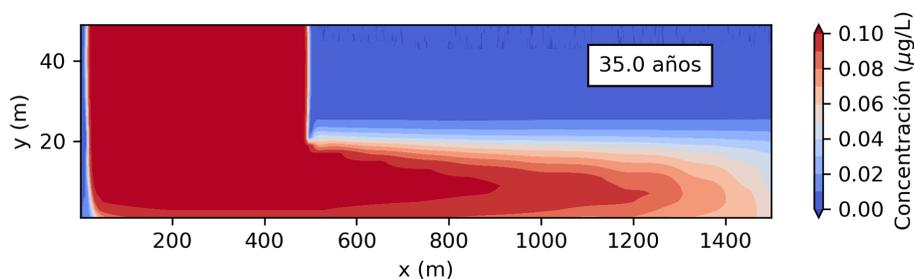
(a) Simulación en 1 año.



(b) Simulación en 5 años.

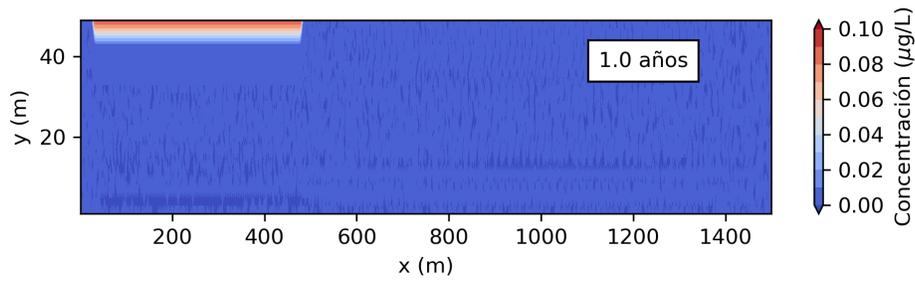


(c) Simulación en 11 años.

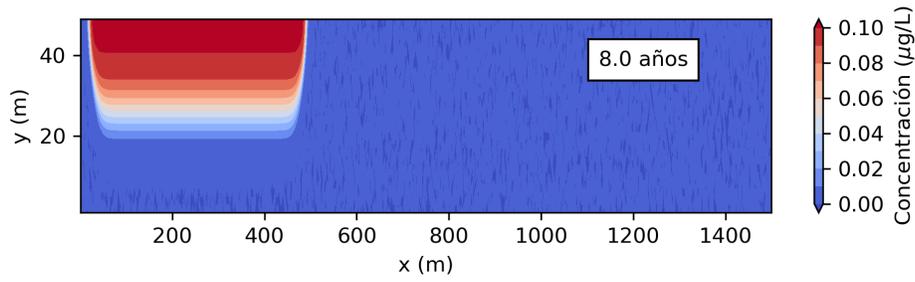


(d) Simulación en 35 años.

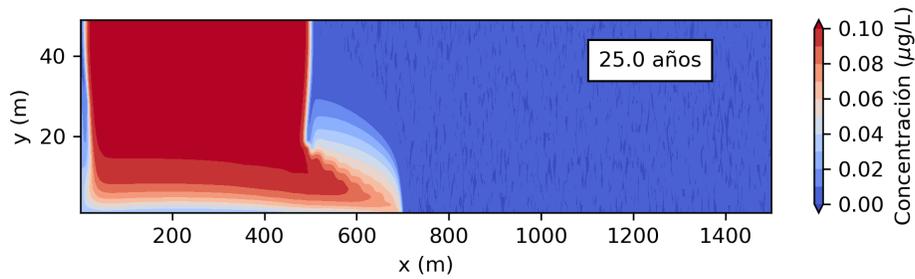
Figura C.61: Concentración del trazador en el lecho poroso con textura arenosa en el Escenario 2. Se visualiza el Caso Base del gravedad inclinada.



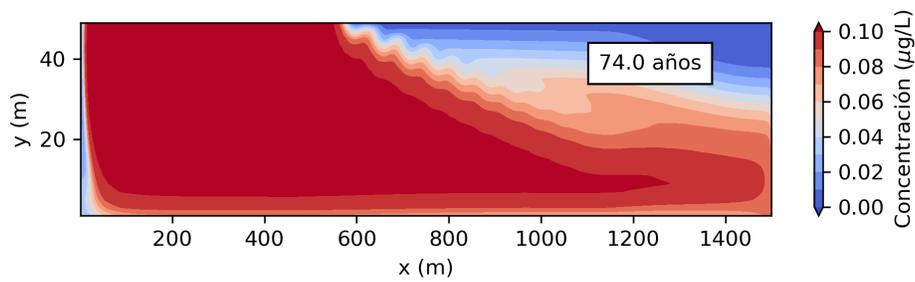
(a) Simulación en 1 año.



(b) Simulación en 8 años.



(c) Simulación en 25 años.



(d) Simulación en 74 años.

Figura C.62: Concentración del trazador en el lecho poroso con textura franco-limosa en el Escenario 2. Se visualiza el Caso Base del gravedad inclinada.

### C.2.2. Razón entre los tiempos de llegada del trazador al estero en función de las variaciones

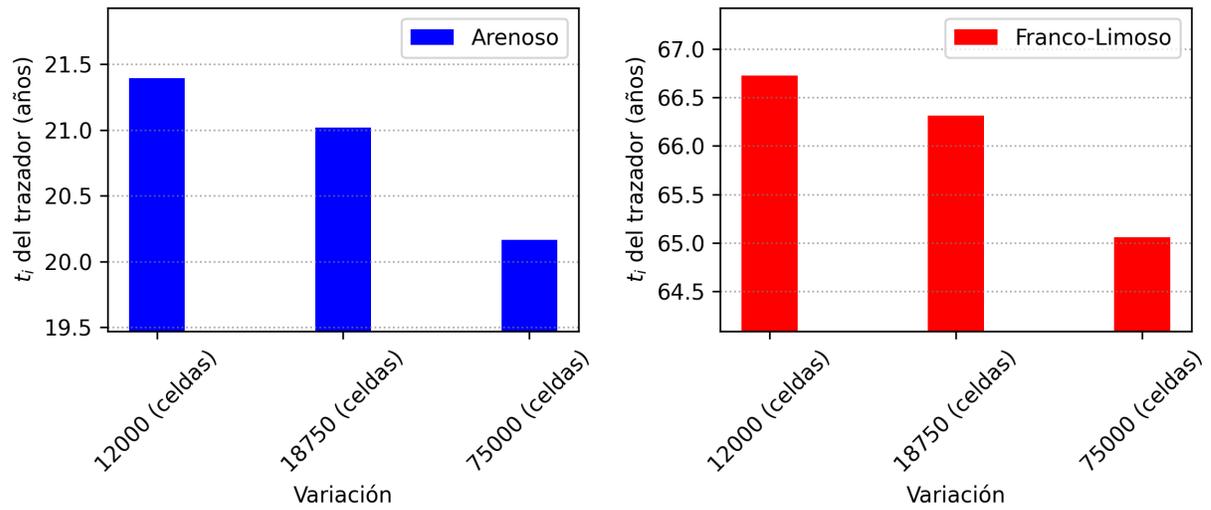


Figura C.63: Tiempos de llegada del trazador al estero en función de la variación de la cantidad de celdas en una malla en el Escenario 2.

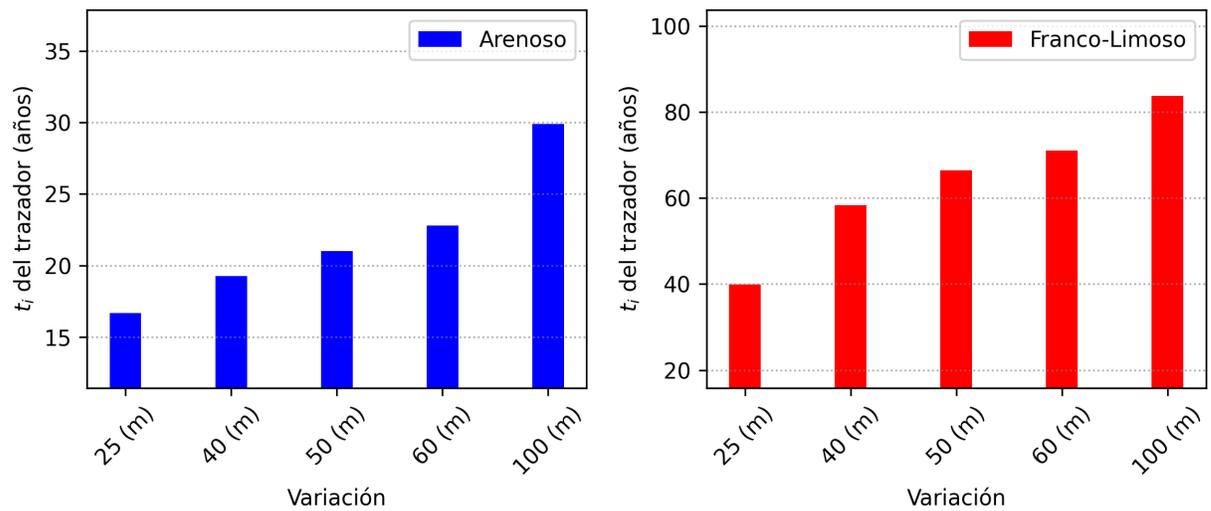


Figura C.64: Tiempos de llegada del trazador al estero en función de la variación de la profundidad del lecho poroso en el Escenario 2.

### C.2.3. Velocidades del trazador en las zonas ubicadas en perpendicular del fondo

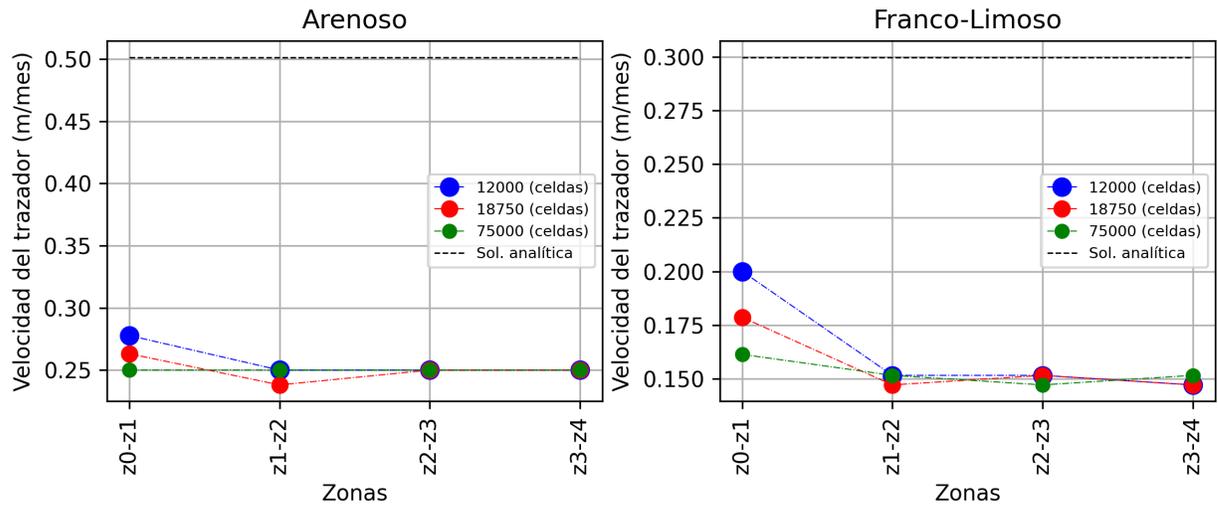


Figura C.65: Velocidades del trazador en función de las distintas zonas ubicadas en perpendicular al fondo del lecho y según la cantidad de celdas utilizadas en la malla en el Escenario 2.

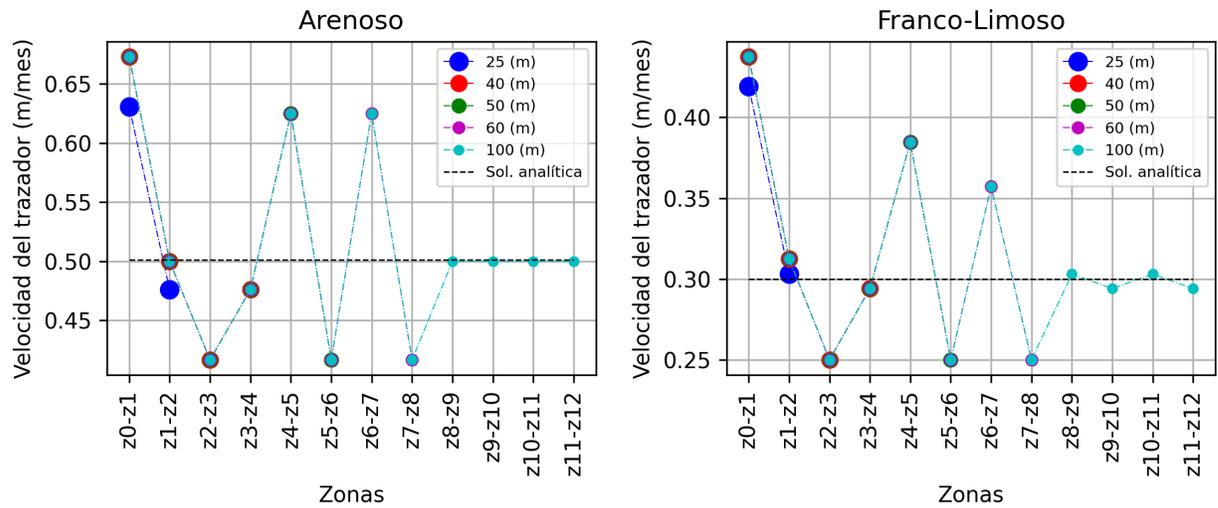


Figura C.66: Velocidades del trazador en función de las distintas zonas ubicadas en perpendicular al fondo del lecho y según la profundidad del lecho poroso en el Escenario 2.

### C.2.4. Velocidades del trazador en las zonas ubicadas en paralelo del fondo

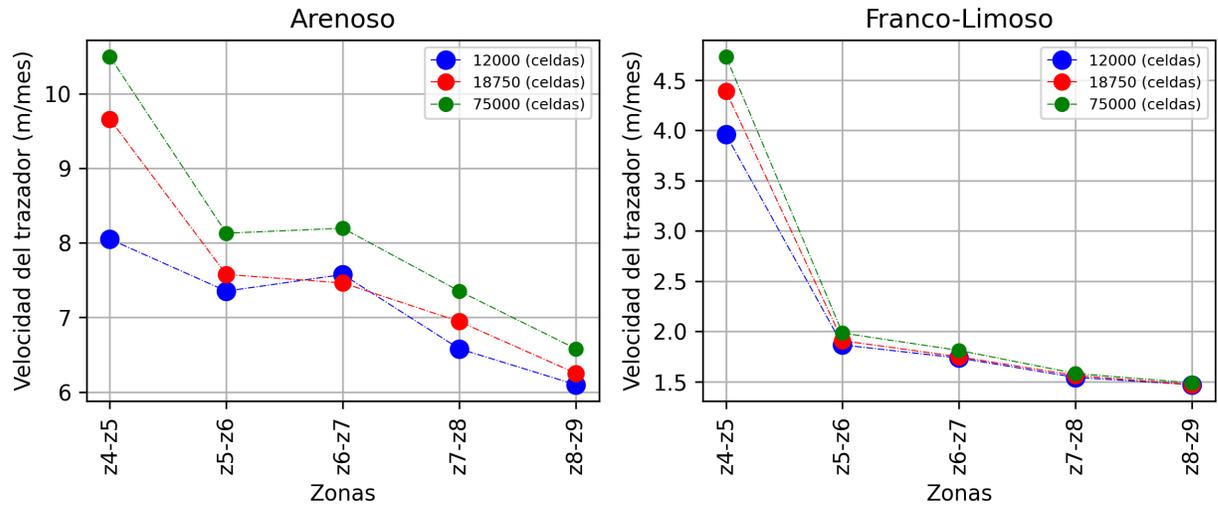


Figura C.67: Velocidades del trazador en función de las distintas zonas ubicadas en paralelo al fondo del lecho y según la cantidad de celdas utilizadas en la malla en el Escenario 2.

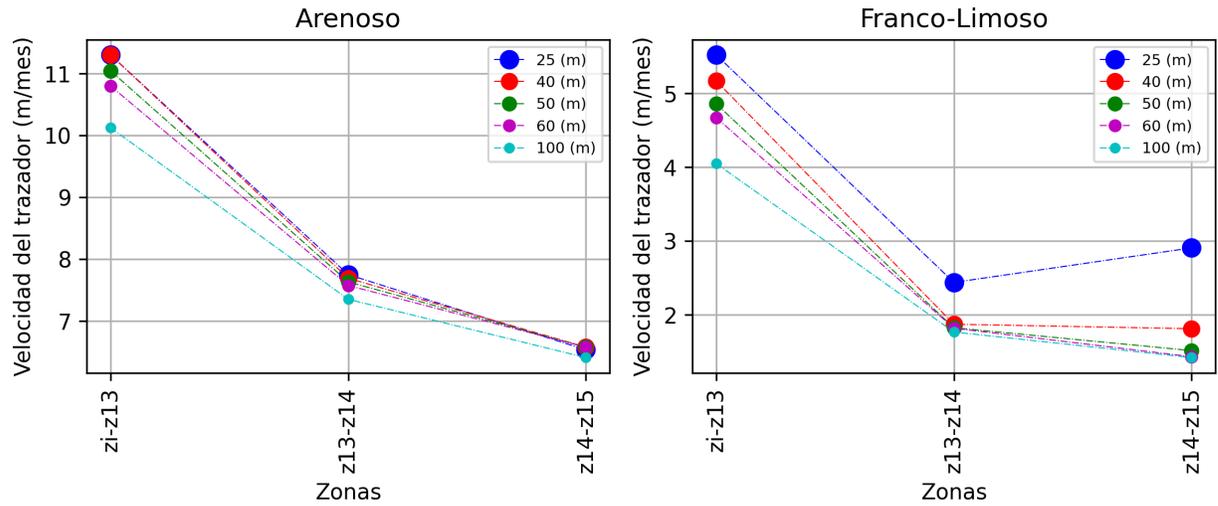


Figura C.68: Velocidades del trazador en función de las distintas zonas ubicadas en paralelo al fondo del lecho y según la profundidad del lecho poroso en el Escenario 2.

### C.3. Ecuaciones utilizadas

Error de tiempo de llegada entre mallas:

$$error = \frac{|t_{i+1} - t_i|}{\frac{(t_{i+1} + t_i)}{2}} \cdot 100 \% \quad (C.1)$$

donde:

- error [%]: Error entre los tiempos de llegada entre la malla  $i$  y la malla más fina  $i + 1$ .
- $t_i$  [años]: Tiempo de llegada al estero al utilizar la malla actual.
- $t_{i+1}$  [años]: Tiempo de llegada al estero al utilizar una malla más fina que la actual.