



Gobierno
de Chile

Ministerio del
Medio
Ambiente

Gobierno de Chile

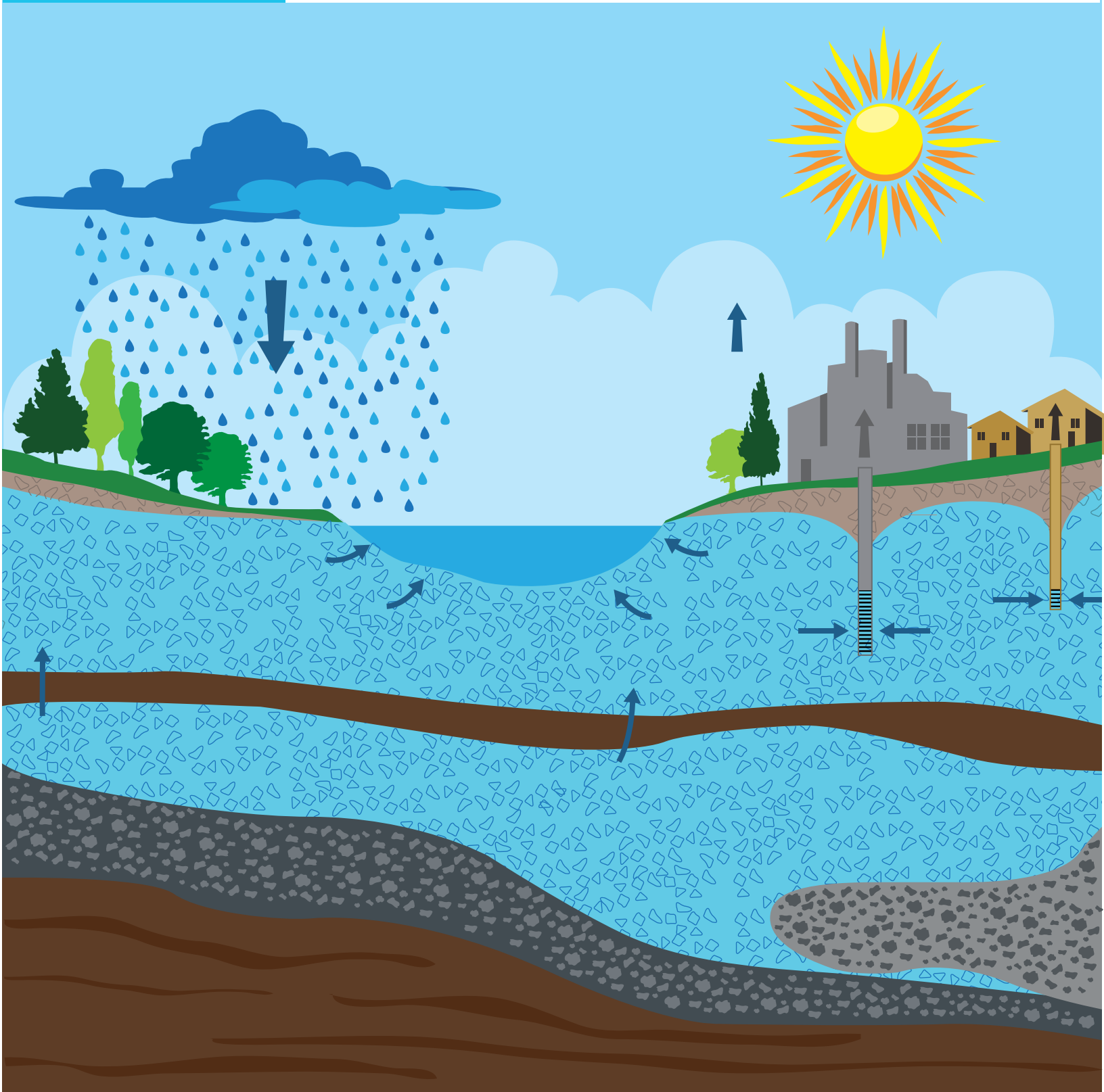
Servicio de
Evaluación
Ambiental

Gobierno de Chile

Dirección
General de
Aguas
Ministerio de Obras
Públicas

Gobierno de Chile

GUÍA PARA EL USO DE MODELOS DE AGUAS SUBTERRÁNEAS EN EL SEIA



GUÍA PARA EL USO DE MODELOS DE AGUAS SUBTERRÁNEAS EN EL SEIA

Editor: Servicio de Evaluación Ambiental, SEA

ISBN: 978-956-9076-12-1

2012

La Guía para el Uso de Modelos de Aguas Subterráneas en el SEIA fue elaborada por el Servicio de Evaluación Ambiental (SEA), proceso liderado por la División de Evaluación Ambiental y Participación Ciudadana, con la colaboración de la División Jurídica.

Agradecemos a todas las personas que hicieron posible esta publicación, especialmente a los profesionales del SEA, del Ministerio del Medio Ambiente, de la Dirección General de Aguas y de la empresa consultora Geohidrología Consultores Ltda, la cual realizó el estudio técnico financiado por el SEA en el cual se basa la presente Guía.

Agradecemos especialmente al profesor Carlos Espinoza C., de la Universidad de Chile, y a Eugenio Celedón C., Jaime Muñoz R. y Fernando Peralta T. del Capítulo Chileno de la Asociación Latinoamericana de Hidrología Subterránea para el Desarrollo (ALHSUD) por su revisión y contribución al estudio técnico.

También agradecemos a los consultores y expertos en modelación de aguas subterráneas que asistieron al taller de presentación de la Guía, en especial a aquellos cuyos valiosos aportes se ven reflejados en esta versión final del documento.

Por último, agradecemos la labor realizada por los profesionales de Geohidrología Consultores Ltda, José Francisco Muñoz P., Cristián Ortiz A., Eduardo Abujatum G. y Christian Gonthier N. por su dedicado trabajo y buena disposición.

PRESENTACIÓN



Dando cumplimiento a un mandato legal, el Servicio de Evaluación Ambiental (SEA) se encuentra uniformando los criterios, requisitos, condiciones, antecedentes y exigencias técnicas de la evaluación de impacto ambiental de proyectos y actividades, entre otros, mediante la elaboración de guías.

Dicha labor requiere establecer criterios comunes y consistentes con el conjunto de competencias ambientales de los distintos órganos de la administración del Estado que participan en el Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA), contribuyendo con la disminución de los márgenes de discrecionalidad en la toma de decisiones y la tecnificación de dicho Sistema.

La presente Guía para el Uso de Modelos de Aguas Subterráneas en el SEIA se hizo en colaboración con el Ministerio del Medio Ambiente y la Dirección General de Aguas, y se basa en la consultoría encargada por el SEA a Geohidrología Consultores Ltda.

La Guía pretende orientar a los titulares y facilitar la labor de los órganos de la administración del Estado competentes. Asimismo, se espera que contribuya a perfeccionar el SEIA y, con ello, fortalecer el cumplimiento de los objetivos que nos aproximen al desarrollo sustentable del país.

Ignacio Toro Labbé
Director Ejecutivo
Servicio de Evaluación Ambiental

ÍNDICE

SIGLAS

1	INTRODUCCIÓN	12
	1.1 OBJETIVOS	12
	1.2 ALCANCES	12
	1.3 USUARIOS	14
2	TEORÍA Y ESTADO DEL ARTE	15
	2.1 ASPECTOS TEÓRICOS EN LA MODELACIÓN	15
	2.2 SOFTWARE RECOMENDADOS	15
3	CONSTRUCCIÓN DE UN MODELO HIDROGEOLÓGICO	17
	3.1 ENFOQUE DE MODELACIÓN	17
	3.2 MODELO CONCEPTUAL	17
	3.2.1 Alcances	18
	3.2.2 Zona de estudio	19
	3.2.3 Recopilación de información	19
	3.2.4 Labores de terreno	21
	3.2.5 Estudios básicos	22
	3.2.6 Preparación del modelo conceptual	24
	3.2.7 Listado de información requerida	26
	3.3 MODELO NUMÉRICO	31
	3.3.1 Límites del dominio de modelación	32
	3.3.2 Definición de la grilla y discretización horizontal	32
	3.3.3 Definición de la discretización vertical	33
	3.3.4 Tipo de modelo en relación a la dinámica temporal	33
	3.3.5 Intervalo de tiempo y horizonte de simulación	34
	3.3.6 Condiciones de borde	34
	3.3.7 Condiciones iniciales	36
	3.3.8 Recarga del acuífero y extracciones	36
	3.3.9 Asignación de parámetros al modelo de flujo y de transporte	37
	3.3.10 Preparación de observaciones para el ajuste del modelo	37
	3.3.11 Listado de información requerida	37
	3.4 AJUSTE DE LA CAPACIDAD PREDICTIVA DEL MODELO Y SIMULACIONES	39
	3.4.1 Asignación de datos para calibración y validación	39
	3.4.2 Calibración	39
	3.4.3 Validación	43
	3.4.4 Análisis de sensibilidad	44
	3.4.5 Simulaciones	44
	3.4.6 Precisión de los resultados	44
	3.4.7 Listado de información requerida	45
4	PRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES	49
	4.1 VARIABLES DEPENDIENTES	49
	4.1.1 Régimen permanente	49
	4.1.2 Régimen transiente	50
	4.2 FLUJOS	51
	4.2.1 Régimen permanente	52
	4.2.2 Régimen transiente	54
	4.2.3 Flujos en las condiciones de borde	55
	4.3 BALANCES DE MASA	57
5	CONTENIDOS MÍNIMOS DEL INFORME TÉCNICO DE MODELACIÓN	59
6	USO DEL MODELO PARA EL DISEÑO DEL PLAN DE SEGUIMIENTO DE LAS VARIABLES AMBIENTALES	60
	6.1 PLAN DE SEGUIMIENTO DE LAS VARIABLES AMBIENTALES	60
	6.2 OBRAS Y/O ACCIONES ASOCIADAS AL PLAN DE SEGUIMIENTO DE LAS VARIABLES AMBIENTALES	61
	6.3 ACTUALIZACIÓN DEL MODELO Y DEL PLAN DE SEGUIMIENTO DE LAS VARIABLES AMBIENTALES	61
7	GLOSARIO	62
8	REFERENCIAS	66
9	ANEXOS	

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1:	Alcance de la presente Guía en el proceso de evaluación de impacto ambiental de un proyecto	13
Figura 2:	Flujograma recomendado para elaborar un estudio geológico	22
Figura 3:	Flujograma recomendado para elaborar un estudio hidrológico	23
Figura 4:	Flujograma recomendado para elaborar un estudio hidrogeoquímico	23
Figura 5:	Flujograma recomendado para elaborar un estudio hidrogeológico	24
Figura 6:	Flujograma recomendado para elaborar un modelo conceptual	24
Figura 7:	Ejemplo de un perfil y mapa geológico	29
Figura 8:	Esquematación conceptual de una zona de estudio	31
Figura 9:	Calibración de un modelo de flujo por prueba y error	41
Figura 10:	Calibración de un modelo de transporte por prueba y error	42
Figura 11:	Ejemplo de un análisis cuantitativo de la calibración	47
Figura 12:	Ejemplo de resultados de calibración o validación en régimen permanente	47
Figura 13:	Ejemplo de resultados de calibración y validación en régimen transiente	48
Figura 14:	Presentación de un mapa de contornos de niveles piezométricos o isopiezas	49
Figura 15:	Comparación cualitativa de la concentración simulada y observada	50
Figura 16:	Presentación de pozos por sectores que muestran un similar comportamiento hidráulico	51
Figura 17:	Representación esquemática de los flujos para régimen permanente	52
Figura 18:	Presentación de flujos para régimen permanente	53
Figura 19:	Presentación de flujos individuales para el régimen transiente	54
Figura 20:	Comparación de valores de recarga impuestos y la realmente leída por el modelo numérico	55
Figura 21:	Comparación de valores de extracción impuestos y la realmente leída por el modelo numérico	56
Figura 22:	Presentación del balance total y error de cierre para simulaciones en régimen permanente	57
Figura 23:	Presentación del balance total y error de cierre para simulaciones en régimen transiente	58

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1:	Software y códigos recomendados para su uso en Chile.....	16
Tabla 2:	Complejidad y alcances de acuerdo a los objetivos de la modelación (adaptada de Middlemis, 2002)	18
Tabla 3:	Información relevante y fuentes de consulta.....	20
Tabla 4:	Listado de información requerida para la elaboración del modelo conceptual.....	26
Tabla 5:	Descripción tipo de las unidades litológicas para la confección de un modelo hidrogeológico	30
Tabla 6:	Ejemplo tipo de caracterización de una cuenca hidrográfica para el desarrollo de un modelo hidrogeológico	30
Tabla 7:	Descripción tipo de la información de variables hidrometeorológicas para la construcción del modelo conceptual	30
Tabla 8:	Encabezado tipo para el catastro de pozos.....	30
Tabla 9:	Encabezado tipo para el catastro de derechos de aprovechamiento.....	30
Tabla 10:	Condiciones de borde	35
Tabla 11:	Listado de información requerida para la elaboración del modelo numérico.....	38
Tabla 12:	Listado de información requerida para evaluar la capacidad predictiva del modelo.....	45
Tabla 13:	Detalle de promedios residuales y error cuadrático medio de la calibración para un modelo de flujo	47
Tabla 14:	Detalle de flujos en régimen permanente	53
Tabla 15:	Valores medios de los flujos para el régimen transiente	54
Tabla 16:	Detalle de flujos para la condición de borde de río	56

SIGLAS



A continuación se listan las siglas que se utilizan en este documento:

CIREN	: Centro de Información de Recursos Naturales
DGA	: Dirección General de Aguas
IGM	: Instituto Geográfico Militar
MAE	: Error Medio Absoluto (<i>Mean Absloute Error</i>)
PSVA	: Plan de Seguimiento de las Variables Ambientales
RMSE	: Raíz del Error Cuadrático Medio (<i>Root Mean Square Error</i>)
SEA	: Servicio de Evaluación Ambiental
SEIA	: Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental
SERNAGEOMIN	: Servicio Nacional de Geología y Minería
USEPA	: Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos
USGS	: Servicio Geológico de los Estados Unidos

1

INTRODUCCIÓN

El agua subterránea almacenada en distintos acuíferos ubicados a lo largo de nuestro país es una fuente cada vez más importante de recursos hídricos, que presenta múltiples ventajas respecto de las fuentes superficiales, a saber: amplia disponibilidad, menor estacionalidad y buena calidad química, entre otras. Además, las aguas subterráneas con frecuencia son el sostén de valiosos ecosistemas naturales, como vegas, bofedales, humedales y lagunas, especialmente en la zona norte del país. Sin embargo, el recurso es vulnerable y muy difícil -y costoso- de remediar en caso de ser sobreexplotado o contaminado, de ahí la importancia de resguardar su uso sostenible.

Para ello, el uso de la modelación cobra especial relevancia ya que permite cuantificar y evaluar los potenciales efectos de un determinado pro-

yecto o actividad sobre un acuífero y sus ecosistemas asociados. Si bien esta herramienta ha sido ampliamente validada durante el tiempo, se debe tener en cuenta que la modelación de aguas subterráneas es un tema complejo, que puede ser abordado con distintos grados de profundidad y utilizando diversos enfoques y metodologías, y que los resultados que se obtienen pueden ser significativamente diferentes dependiendo de la forma en que se desarrolle la modelación. Siendo así, se ha visto la necesidad de establecer, a través de la presente Guía, un protocolo de uso de dichos modelos para el caso chileno, que presente criterios claros y la información mínima necesaria para la evaluación, de manera de avanzar en mejorar la evaluación ambiental en el país y dar cumplimiento al mandato legal establecido en la Ley N° 19.300.

1.1 OBJETIVOS

Se espera que la presente Guía establezca una base en cuanto a los contenidos mínimos que deben acompañar una modelación, de tal forma que se entregue la información relevante y suficiente para su evaluación. Asimismo, se pretende que entregue criterios útiles para la elaboración de un modelo en sus distintas etapas, mejorando así el nivel de confianza en los

resultados que se obtengan. Con todo lo anterior, el objetivo final apunta a mejorar la calidad de los modelos desarrollados por los titulares de proyectos que se presentan al SEIA y facilitar la evaluación de éstos por parte de los órganos de la administración del Estado con competencia ambiental, contribuyendo así a mejorar el estándar de la evaluación ambiental en el país.

1.2 ALCANCES

La Figura 1 ilustra las principales etapas del proceso de evaluación de impacto ambiental de un proyecto y el alcance de la presente Guía dentro de dicho proceso.

La identificación del uso de recursos y emisiones en un proyecto y la cuantificación de ellos forman parte de la descripción del proyecto, tanto en una Declaración de Impacto Ambiental (DIA) como en un Estudio de Impacto Ambiental (EIA).

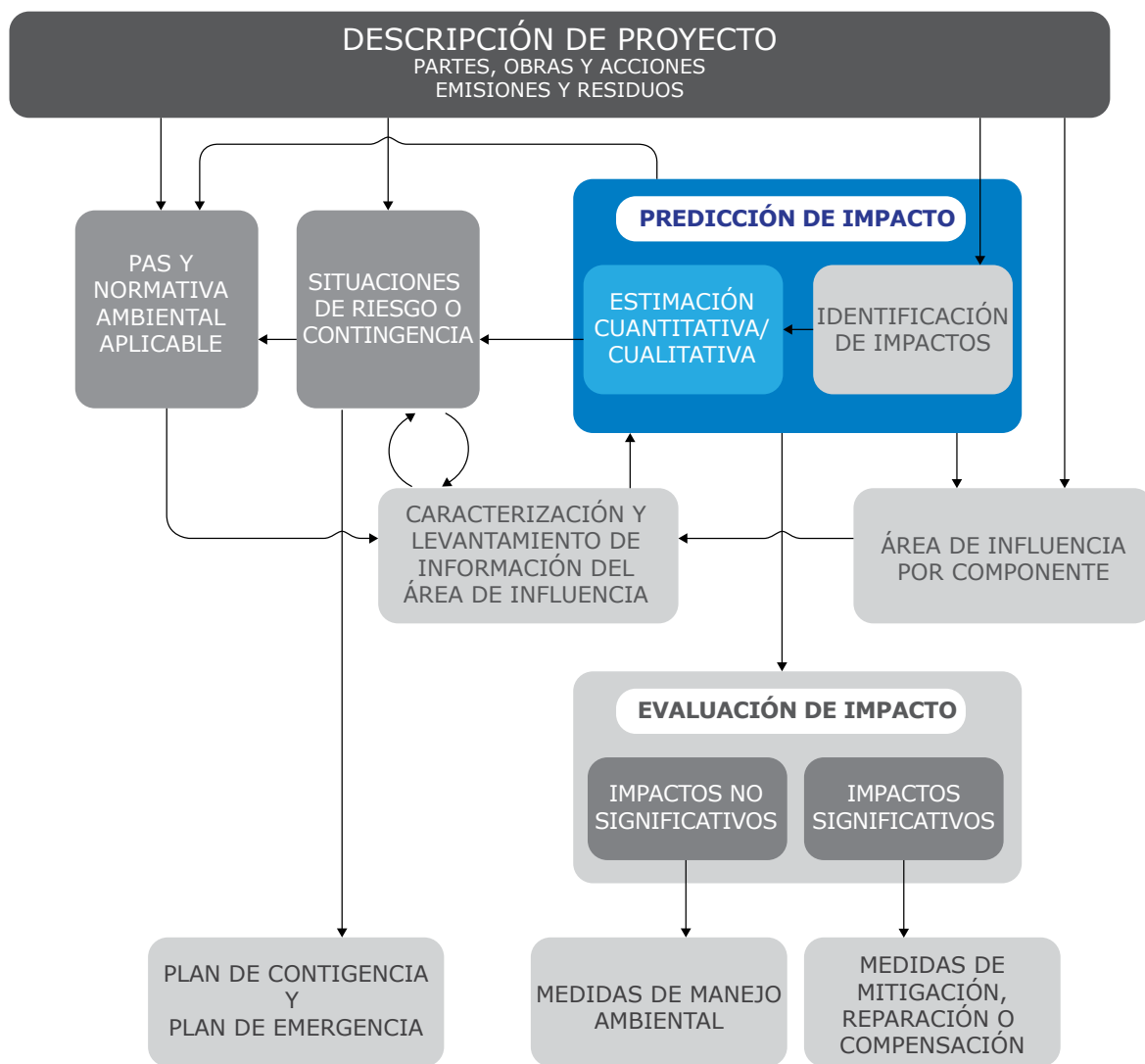
A partir de dicha descripción, es posible la identificación de impactos potenciales. Por ejemplo, si el proyecto extrae aguas subterráneas, un impacto del proyecto sería “descenso de los niveles de aguas subterráneas”, ligado a la componente hidrogeología, lo que a su vez y dependiendo de la caracterización del área de influencia, podría ocasionar impactos sobre otros componentes ambientales como flora y/o fauna.

Para establecer si los impactos identificados son o no significativos¹, se requiere realizar primero una estimación del impacto, ya sea cualitativa o cuantitativa dependiendo del componente ambiental y la información disponible. A la identificación y estimación de impactos se le denomina predicción de impactos.

La significancia de todos los impactos identificados se establece en función de criterios establecidos en la Ley N° 19.300, el Reglamento del SEIA y en guías específicas, etapa identificada como evaluación de impacto.

En este contexto, el alcance de la presente Guía es abordar la estimación, a través de modelación, del impacto producido por la extracción o alteración de la calidad de las aguas subterráneas sobre la cantidad y calidad del recurso agua².

¹Se entiende como impactos significativos aquellos efectos, características y circunstancias establecidos en el artículo 11 de la ley n° 19.300.



Alcance de esta guía

Figura 1: Alcance de la presente guía en el proceso de evaluación de impacto ambiental de un proyecto.

²Según lo dispuesto en la letra b) del artículo 11 de la Ley 19.300.

La Guía abarca, de forma general, una amplia gama de aspectos de la modelación de aguas subterráneas ofreciendo ciertas metodologías, criterios (recomendaciones) y señalando información mínima relevante para elaborar y presentar un buen modelo hidrogeológico.

Los aspectos más generales abordados por la Guía (requerimientos de información mínima, presentación de los resultados y algunos criterios) han sido desarrollados de tal forma que puedan ser aplicables a prácticamente cualquier modelación hidrogeológica que forme parte de una evaluación ambiental.

En cuanto a los contenidos técnicos de mayor especificidad, es importante señalar que la presente Guía no pretende ser un documento exhaustivo aplicable a cualquier caso, sino que más bien se ha desarrollado con la finalidad de acotar el amplio espectro de la modelación hidrogeológica. De esta forma, la Guía se centra en el caso que más frecuentemente se encuentra en las evaluaciones de impacto ambiental en Chile, esto es la modelación de flujo en medios porosos saturados. Si bien se incluyen también algunos criterios y recomendaciones para la modelación de transporte de solutos, esto se aborda con un nivel de detalle menor. Lo mismo ocurre para otros casos como la modelación de acuíferos kársticos y fracturados, lo cual se aborda someramente puesto que los casos de este tipo son generalmente acotados y requieren de un tratamiento especial.

Es importante reconocer también que toda modelación en hidrogeología está sujeta siempre a las características particulares del sitio de estudio, a sus condiciones hidrológicas específicas y a los objetivos y alcances del proyecto a desarrollar, así como a los objetivos y alcances de la evaluación ambiental a la cual acompaña. Siendo así, existe un factor importante de influencia del caso a caso en las modelaciones que no puede ser desconocido. En este sentido, una gran parte de las recomendaciones o criterios establecidos en la Guía pueden ser reemplazados por otros, siempre y cuando se provea de una sólida fundamentación técnica que respalde lo adoptado según el caso en estudio. Por el contrario, el sólo y estricto cumplimiento de lo recomendado en la Guía no garantiza que una modelación cumpla con todos los requerimientos para ser juzgada como adecuada, ya que los contenidos de la Guía apuntan a definir un estándar mínimo, pero no necesariamente suficiente, lo cual depende de las necesidades de cada caso.

Es por ello que este es un documento de carácter indicativo y referencial, siendo responsabilidad de los titulares de los proyectos o actividades entregar toda la información relevante, lo que en definitiva se define en función de las características propias de cada proyecto.

Como todas las Guías elaboradas por el SEA, esta guía será objeto de revisión y actualización permanentes.

1.3 USUARIOS

La presente Guía consiste en un documento de carácter técnico, por lo que el contenido de ésta dice relación con aspectos específicos relacionados a la modelación conceptual y numérica de las aguas subterráneas. Si bien el lenguaje y la forma en

cómo se presenta intentan entregar los contenidos de manera sencilla, esto no le resta especificidad y debe tenerse presente que el documento está dirigido a profesionales conocedores en la materia, tanto usuarios de modelos como revisores.

2

TEORÍA Y ESTADO DEL ARTE

2.1

ASPECTOS TEÓRICOS EN LA MODELACIÓN

Un modelo es una representación simplificada de la realidad. Existen diversos tipos de modelos, tales como físicos, analógicos y analíticos, entre otros, siendo los modelos numéricos los que, sustentados en la capacidad de cálculo de los computadores y el desarrollo de códigos y *software*, permiten resolver y cuantificar el comportamiento del flujo y transporte en sistemas hidrogeológicos complejos, mediante la discretización del área de interés y de las ecuaciones gobernantes³.

Un modelo numérico está fundamentado en el desarrollo de un modelo conceptual, el cual corresponde a una simplificación del sistema acuífero real, pero que retiene sus aspectos más relevantes. Un modelo numérico es en esencia un balance de masas, que se resuelve mediante la adopción de ciertas condiciones que permiten, en conjunto con la demás información disponible, obtener los valores de las variables dependientes en todo el dominio de modelación. Estas variables corresponden a los niveles piezométricos (o

niveles de energía) para modelos de flujo y a las concentraciones para modelos de transporte.

Dada la complejidad inherente a los sistemas hidrogeológicos, y al tipo de problema en el cual se desea utilizar esta herramienta, existe una amplia variedad de situaciones que pueden ser de interés para la modelación, por ejemplo: acuíferos en medios porosos o medios fracturados, flujos en condiciones saturadas y no saturadas, flujos con densidad uniforme y variable, y transporte de contaminantes conservativos y no conservativos (o reactivos).

Generalmente, los modelos numéricos no son capaces de representar todos estos fenómenos de forma simultánea. De esta manera, llevar a cabo una correcta elección del *software* y la posterior construcción del modelo numérico es trascendental, puesto que está íntimamente ligada a los procesos particulares del sistema natural e incide a su vez en la estabilidad, convergencia numérica y en la precisión de los resultados.

2.2

SOFTWARE RECOMENDADOS

Existe una gran variedad de *software* numéricos para la resolución de problemas asociados a las aguas subterráneas. Estos *software* permiten modelar desde problemas sencillos, como la evolución de plumas bidimensionales en condiciones ideales, hasta complejos problemas tridimensionales que se resuelven acoplados para flujo y transporte. De acuerdo a su método numérico de aproximación es posible clasificar la mayoría de estos *software* numéricos en dos grandes grupos: aquellos que basan sus cálculos en el método de diferencias finitas (por ejemplo, Visual Modflow y Groundwater Vistas) y aquellos que se fundamentan en el método de elementos finitos (por ejemplo, Feflow) siendo ambos grupos de modelos aplicables a varios tipos de casos prácticos⁴.

Es importante destacar que a nivel global, y particularmente en Chile, existe una amplia hegemonía en el uso del código MODFLOW. Esto se debe a que su uso ha probado ser adecuado para

simular flujo en medios porosos saturados, situación técnica más comúnmente analizada en estudios ambientales y técnicos en Chile y otros países, lo que le ha valido ser utilizado en gran parte de los organismos gubernamentales, e incorporado en una amplia variedad de *software* (Visual Modflow, Groundwater Vistas, entre otros).

En la Tabla 1 se incluyen algunos ejemplos de códigos y *software* recomendados ya sea para modelar flujo o transporte considerando las distintas condiciones del medio, junto con los casos prácticos típicamente asociados en Chile. La lista de *software* indicada es referencial, y se reconoce que existe un gran número de ellos que han sido validados y que pueden ser utilizados para simular diversas situaciones⁵. En cualquier caso, el aspecto fundamental reside en que el *software* seleccionado incluya todos los elementos, procesos y condiciones que sean identificados en el modelo conceptual, y permita así una correcta representación del sistema hidrogeológico.

³Ver Anexo A1.

⁴Ver Anexo A1.

⁵Ver Anexo A2.

Tabla 1: Ejemplos de *Software* y códigos recomendados para su uso en Chile

Objetivo	Tipo de flujo	Aplicación práctica	Software / Código
Modelar flujo	Flujo saturado	Aplicable a la mayoría de los problemas prácticos en Chile, por ejemplo para flujo en los valles transversales	GMS
			Groundwater Vistas
			Modelmuse
			Visual Modflow
	Flujo no saturado	Puede ser importante de modelar para casos donde sea relevante representar la conexión entre la hidrología subterránea y superficial a través de procesos como la infiltración y evapotranspiración	Feflow
			GMS (Femwater)
			Hydrus 1D
			VS2DI
	Flujo con densidad variable	Fundamental para la representación correcta de la dinámica de flujos en salares y acuíferos costeros	Feflow
			GMS (Femwater)
			Seawat
			Sutra
Modelar transporte	Flujos en acuíferos fracturados y medios Kársticos	Uso para condiciones muy particulares en las cuales existe una marcada anisotropía del sistema que se busca representar	Feflow
			GMS
			Groundwater Vistas
			Visual Modflow
	Flujo saturado	Aplicable a la mayoría de los problemas prácticos en Chile, por ejemplo para flujo en los valles transversales	GMS
			Groundwater Vistas
			Modelmuse
			Visual Modflow
			Feflow
			GMS (Femwater)
	Flujo no saturado	Puede ser importante de modelar para casos donde sea relevante representar la conexión entre la hidrología subterránea y superficial a través de procesos como la infiltración y evapotranspiración	Hydrus 1D-2D/3D
			VS2DI

3

CONSTRUCCIÓN DE UN MODELO HIDROGEOLÓGICO

3.1

ENFOQUE DE MODELACIÓN

En el proceso para construir un modelo hidrogeológico se pueden distinguir dos grandes etapas: la elaboración del modelo conceptual y la elaboración del modelo numérico.

La elaboración de un modelo conceptual debe ser el punto de partida en la construcción de cualquier modelo hidrogeológico. En esta etapa se representan en forma simplificada los elementos más importantes del sistema físico y su comportamiento, basándose en todos los antecedentes técnicos disponibles (geología, hidrología, hidrogeoquímica e hidrogeología). Asimismo, dependiendo de la cantidad y calidad de dichos antecedentes, quedan definidos en esta etapa los alcances de la futura modelación, sus limitaciones y la precisión esperada de los resultados.

La elaboración de un modelo numérico consiste en llevar los elementos establecidos en el modelo conceptual a una formulación matemática, que permita establecer una estimación cuantitativa más precisa de las variables de estado (niveles piezométricos y concentraciones) y

eventualmente acotar mejor las estimaciones preliminares del modelo conceptual.

Según lo anterior, es importante reconocer que el modelo numérico reposa íntegramente sobre la base teórica determinada en el modelo conceptual, y por lo tanto los esfuerzos para desarrollar una correcta modelación numérica no pueden ser independientes de lo establecido en el modelo conceptual, sino que, por el contrario, sólo cobran sentido una vez que el modelo conceptual ha sido considerado satisfactorio para cumplir con los objetivos previamente definidos. Dicho de otra manera, una modelación numérica solo será representativa y confiable en la medida en que la modelación conceptual que subyace detrás lo sea.

De esta forma, se considera que para evaluar los resultados de un modelo numérico es imprescindible llevar a cabo una evaluación de éste en conjunto con el modelo conceptual y todos los antecedentes técnicos que lo sustentan. Siendo así, la presente Guía vuelca una parte importante de los esfuerzos en la modelación conceptual, que se detalla a continuación.

3.2

MODELO CONCEPTUAL

La modelación conceptual es muy importante en el desarrollo de un modelo hidrogeológico, ya que permite establecer las principales características del sistema real que serán consideradas dentro del proceso de modelación. La elaboración de un modelo conceptual requiere de una revisión detallada de la información disponible, labores de terreno y estudios básicos, lo que servirá de sustento técnico a la hora de definir las condiciones hidrogeológicas que serán representadas luego en el modelo numérico y determinarán, además, la precisión y la capacidad predictiva del mismo.

Debido a la naturaleza física del flujo del agua subterránea, los resultados de la modelación conceptual de un sistema hidrogeológico deben incluir como mínimo la caracterización de la geometría del acuífero, los parámetros hidrogeológicos que lo representan, las entradas y salidas del sistema, la piezometría (sentido del flujo), el tipo de acuífero(s) y la hidroquímica. Por último, considerando todos los atributos en conjunto, se debe establecer un balance hídrico preliminar.

3.2.1 Alcances

El desempeño del modelo numérico depende fuertemente de la conceptualización a partir de la cual fue originado. De esta forma, mientras más robusto⁶ sea el modelo conceptual, los resultados de las simulaciones tendrán asociada una mayor credibilidad.

Un modelo conceptual robusto debería ser desarrollado en base al principio de parsimonia, que se refiere a un equilibrio entre los objetivos de la modelación y el nivel de detalle considerado. Un modelo conceptual demasiado simple podría

no ser capaz de representar las principales características y heterogeneidades del sistema, por el contrario, un modelo conceptual complejo se traduce en un mayor número de parámetros y grados de libertad del sistema, lo que puede aumentar las dificultades relacionadas a la *no unicidad*⁷ en la solución numérica posterior.

En la Tabla 2 se presenta, a modo referencial, el nivel de complejidad y duración esperada en relación a los objetivos y requerimientos de una modelación.

Tabla 2: Complejidad y alcances de acuerdo a los objetivos de la modelación (adaptada de Middlemis, 2002)

Complejidad	Objetivos	Información requerida	Duración típica
Básica	<ul style="list-style-type: none"> Estimaciones gruesas Sistemas simples Generalmente permite utilizar modelos analíticos 	<ul style="list-style-type: none"> Limitada información de la zona de estudio Parámetros frecuentemente obtenidos de la literatura Información mínima respecto a la geometría y recarga Experiencia 	< 1 mes
Media	<ul style="list-style-type: none"> Respuesta a un fenómeno en particular Predicción de impactos Supuestos conservadores cuando no se tienen datos Resolución numérica, eventualmente se puede resolver analíticamente 	<ul style="list-style-type: none"> Alguna información de la zona de estudio Problemas de extracción requieren buena información en la geometría y parámetros del acuífero Problemas de disponibilidad requieren buena información de variables hidrológicas Enfoque conservativo cuando la información es limitada Información mínima respecto a niveles, respuesta del acuífero frente a precipitaciones, recarga, caudales, variaciones en los parámetros hidrogeológicos con la profundidad, condiciones de borde 	1 - 6 meses
Alta	<ul style="list-style-type: none"> Predecir el comportamiento del sistema frente a cambios arbitrarios en las condiciones hidrológicas Predicción de impactos Evaluación confiable en diversas situaciones Generalmente requiere modelación numérica 	<ul style="list-style-type: none"> Información detallada, con monitoreo constante e interpretación Esfuerzo considerable en el desarrollo y refinamiento del modelo conceptual Recomendado un desarrollo por etapas Información adicional detallada sobre extracciones, precipitaciones, evaporación, flujos superficiales, niveles de cuerpos de agua superficial 	> 6 meses

⁶Se entenderá que un modelo es robusto en la medida que las hipótesis que utilice tengan sustento en información levantada en terreno y que sea representativa de la zona de estudio.

⁷La *no unicidad* se refiere a la condición en que distintas combinaciones de parámetros generan la misma solución.

En general una evaluación de impacto ambiental sobre la cantidad y/o calidad del recurso hídrico requiere de la elaboración de una modelación de alta complejidad, lo que involucra importantes esfuerzos en obtener información detallada de las variables relevantes y en la conceptualización del sistema. Los casos en que una modelación de media complejidad es

suficiente son contados, y obedecen a condiciones idealizadas y bajos niveles de riesgo asociado a las incertidumbres. A su vez, la modelación de baja complejidad puede resultar útil cuando se llevan a cabo estimaciones preliminares (*screening*), y puede llevar asociada posteriores modelaciones de media u alta complejidad.

3.2.2 Zona de estudio

La escala de trabajo requerida puede variar dependiendo del estudio específico, ya sea geológico, hidrológico, hidrogeoquímico o hidrogeológico y/o de los fenómenos a representar. En general se considera como escala local aquella que comprende una superficie menor a 5 km², escala distrital aquella que abarca entre 5 km² y 250 km² y escala regional aquella de superficie mayor a 250 km².

Para la estructuración del modelo conceptual de una determinada área se requiere inicialmente la delimitación precisa de la zona de estudio⁸, junto con la definición de una escala de trabajo acorde a los alcances y objetivos de la modelación. Es importante, para una correcta representación de dicha zona, mantener la consistencia de las coberturas básicas -principalmente las curvas de nivel del terreno y la red de drenaje natural- en las distintas etapas del trabajo.

3.2.3 Recopilación de información

La recopilación de información se refiere a la consulta de bases de datos de distintos organismos públicos nacionales e internacionales (IGM, DGA, CIREN, SERNAGEOMIN, SEIA, USGS, USEPA, entre otros), revisión de estudios anteriores y antecedentes propios del interesado cuando dispone de un seguimiento sistemático de redes

de monitoreo de aguas superficiales y/o subterráneas, ya sea en cantidad y/o en calidad.

La Tabla 3 muestra la información básica que se requiere normalmente para elaborar un modelo conceptual, junto con su descripción y las principales fuentes para su obtención.

⁸En este caso la "zona de estudio" no debe confundirse con el concepto de "área de influencia". El concepto aquí presente se refiere a un espacio mayor al área de influencia, que abarca toda la extensión territorial necesaria para recabar información que permita sustentar al modelo conceptual.

Tabla 3: Información relevante y fuentes de consulta

Ámbito	Información	Tipo o descripción	Fuentes principales
Global	Cartas topográficas	Cartografía a escalas variables de antecedentes básicos (curvas de nivel, red de drenaje, trama de caminos, entre otros)	Información propia del titular Instituto Geográfico Militar (IGM). Escalas entre 1:25.000 y 1:500.000 Comisión Nacional de Riego (CNR). Escala 1:10.000
		Mosaico digital de la superficie de la tierra	Google Earth
	Imágenes satelitales y modelos digitales de terreno (MDT)	Imágenes Landsat y MDT SRTM (georreferenciadas)	USGS, US Geological Survey Universidad de Maryland
		Fotografías aéreas	Servicio Aerofotogramétrico (SAF). Escalas entre 1:5.000 y 1:70.000, a partir de vuelos preestablecidos
		Ortofotos (fotografías aéreas corregidas y georreferenciadas)	Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN). Escalas 1:5.000, 1:10.000 y 1:20.000.
Hidrológico	Precipitación, temperatura, evaporación y otras variables meteorológicas	Series sistemáticas en el tiempo	Control propio del titular Banco Nacional de Aguas (BNA) de la Dirección General de Aguas (DGA) Balance Hídrico de Chile (DGA-MOP, 1987) Dirección Meteorológica de Chile Recopilación de registros (estudios públicos existentes, SEIA) Bases de datos internacionales (SE-NAMHI – BOLIVIA, NOAA – EE. UU, entre otras)
		Series sistemáticas de tiempo	Banco Nacional de Agua (BNA) de la DGA Recopilación de registros (estudios públicos existentes, SEIA)
	Caudales en cauces naturales	Superficie sembrada, tipo de cultivo, método de riego, entre otros	Censos nacionales agropecuarios del INE (resumen a nivel comunal)
		Cobertura de redes de canales	CIREN, CNR, Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA)
		Catastro de plantaciones frutícolas	Trabajos propios del titular
Geológico/ Hidrogeológico	Cartas geológicas e hidrogeológicas	Cartografía a escalas variables de afloramientos superficiales y estructuras, antecedentes hidrogeológicos (profundidad de la napa, caudales específicos, etc.)	Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN). Escalas entre 1:100.000 y 1:1.000.000 Mapa Hidrogeológico de Chile (DGA-MOP, 1986).
		Perfiles geofísicos (diversas técnicas disponibles)	Estudios propios realizados por el titular
	Estratigrafías de pozos y perfil de habilitación	Esquema de los materiales de relleno que se encuentran en profundidad durante la perforación de un sondeo y su habilitación correspondiente separando tramo captante de tubería ciega	Sondajes ejecutados por el titular Expedientes de pozos disponibles en la DGA Carpetas de pozos disponibles en CI-REN Anexos y planos de informes hidrogeológicos previos
		Series sistemáticas en el tiempo	Monitoreo propio del titular BNA de la DGA Recopilación de registros (estudios públicos anteriores, SEIA)
		Nivel puntual medido antes de la ejecución de la prueba de bombeo inicial	Catastros de pozos (estudios públicos anteriores, SEIA) Expedientes de pozos disponibles en la DGA
	Niveles de la napa subterránea en pozos	Registros en una zona para un período determinado	Campañas de mediciones (estudios públicos anteriores, SEIA)

Ámbito	Información	Tipo o descripción	Fuentes principales
Hidrogeoquímico	Calidad del agua (superficial y subterránea)	Series sistemáticas en el tiempo	Monitoreo propio del titular
		Mediciones de un conjunto de parámetros físico-químicos en una estación en el tiempo	BNA de la DGA
Hidrogeológico	Ensayos hidráulicos	Registros completos de pruebas hidráulicas de diversa índole realizadas por el titular	Base de datos del titular, expedientes de proyectos en el SEIA
		Registro completo de pruebas de gasto variable y pruebas de gasto constante inicial	Expedientes de pozos disponibles en la DGA Carpetas de pozos disponibles en CI-REN
		Caudal estabilizado v/s depresión del nivel correspondiente (prueba de bombeo inicial)	Catastros de pozos (estudios públicos anteriores, SEIA)
	Derechos de aprovechamiento agua subterránea	Nómina oficial para un acuífero actualizada a una fecha determinada	Colección documental DGA (informes técnicos)
		Registros públicos de solicitudes anuales	DGA
		Registros públicos de concesiones anuales	DGA
	Extracciones de agua subterránea	Explotación efectiva en el tiempo (control de volúmenes)	Seguimiento propio del titular (típico en minería) Expedientes de proyectos aledaños en el SEIA Control A.P.R. y sistemas urbanos
		Explotación aproximada histórica para uso de agua potable (A.P.)	Facturaciones de empresas de agua potable
		Explotación aproximada para uso de riego	Encuestas de terreno (estudios públicos anteriores, SEIA)
		Pago de patentes por no uso	DGA

3.2.4 Labores de terreno

Debido a que cada estudio hidrogeológico es sitio-específico, la sola revisión de antecedentes normalmente no basta para obtener la información suficiente para elaborar un modelo conceptual acorde a las necesidades requeridas. Siendo así, es muy frecuente que sea necesario llevar a cabo campañas de terreno destinadas a generar información complementaria. Estas labores de terreno tienen relación, entre otros, con los siguientes aspectos:

- Reconocimiento geológico, geomorfológico y estructural.
- Campañas geofísicas.
- Catastro de pozos y sondajes.
- Perforación y habilitación de sondajes.
- Monitoreo de niveles y/o concentraciones de pozos.
- Ensayos hidráulicos.
- Estimación de tasas de evaporación.
- Muestreo de agua, suelo, roca y efluentes.
- Otras mediciones de terreno (en especial aforos e información meteorológica).
- Instalación de estaciones fluviométricas y/o meteorológicas.

3.2.5 Estudios básicos

La información recopilada y las labores de terreno se deben relacionar con el desarrollo de los estudios que permitan elaborar y complementar el modelo conceptual. Estos estudios multidisciplinarios abarcan las áreas de la hidrología, geología, hidrogeoquímica e hidrogeología⁹.

El estudio geológico tiene como objetivo caracterizar la geología de superficie y sub-superficie. En particular, busca definir el contacto roca - relleno y delimitar las unidades geológicas y estructuras geomorfológicas.

El estudio hidrológico se centra en los procesos hidrológicos superficiales, como las precipitaciones, escurrimientos y la evaporación, con la finalidad de estimar la recarga del sistema acuífero por precipitación producto de estos fenómenos¹⁰.

El estudio hidrogeoquímico utiliza los análisis de la composición de las aguas para comprender con mayor certeza las dinámicas de los flujos y su interacción y es, además, fundamental para elaborar modelos de transporte de contaminantes y en estudios que aborden aspectos de calidad del agua.

El estudio hidrogeológico está orientado a determinar los rangos y distribución espacial de los parámetros hidrogeológicos (reflejo de las propiedades del acuífero y su anisotropía), así como también a caracterizar el comportamiento del sistema subterráneo (interacción acuífero - cuerpos superficiales, niveles piezométricos, entradas y salidas del sistema, etc.).

Los estudios básicos, sus principales componentes y los resultados esperados de ellos (cuadros en azul), se presentan mediante diagramas de flujo en la Figura 2, 3, 4 y 5.

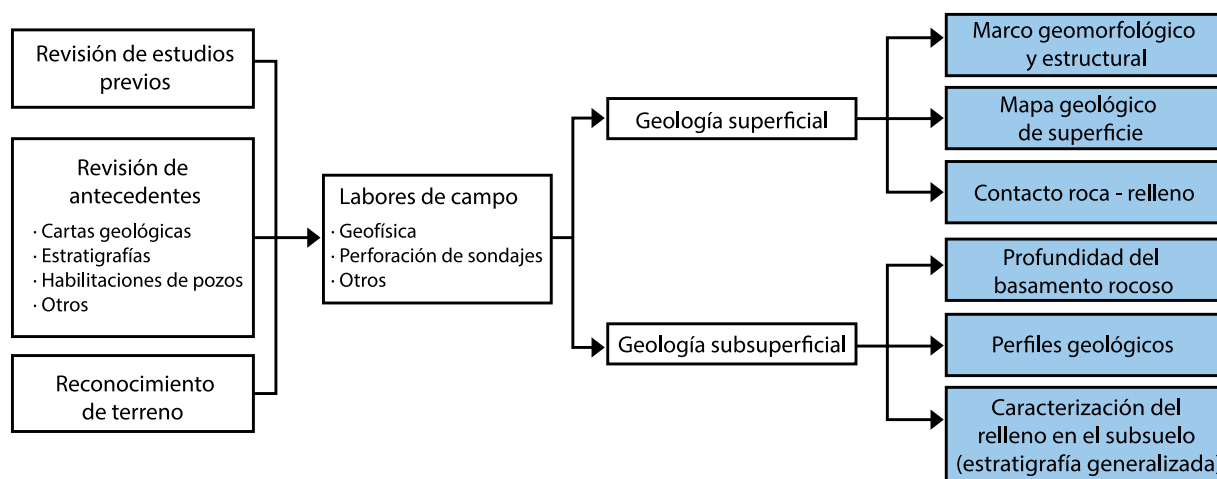


Figura 2: Flujoograma recomendado para elaborar un estudio geológico.

⁹Los contenidos y objetivos de los estudios se presentan en detalle en el Anexo A3.

¹⁰Pese a que la estimación de otras fuentes de recarga como infiltración de canales, excedentes de riego predial pueden formar parte también del estudio hidrológico, en esta Guía se tratan como resultados del estudio hidrogeológico.

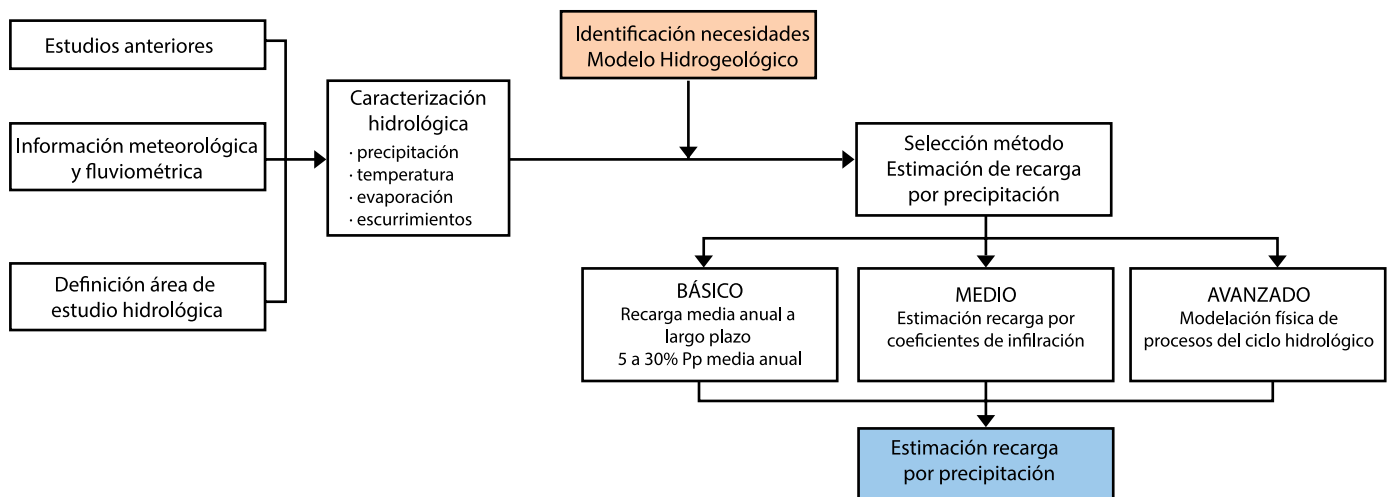


Figura 3: Flujograma recomendado para elaborar un estudio hidrológico.

Nota: el método básico para estimar la recarga entrega un rango amplio que responde a una diversidad de condiciones locales que se pueden encontrar a lo largo del país. Cada estudio debería determinar fundadamente un valor medio y un rango más acotado que sea representativo de sus propias condiciones locales.

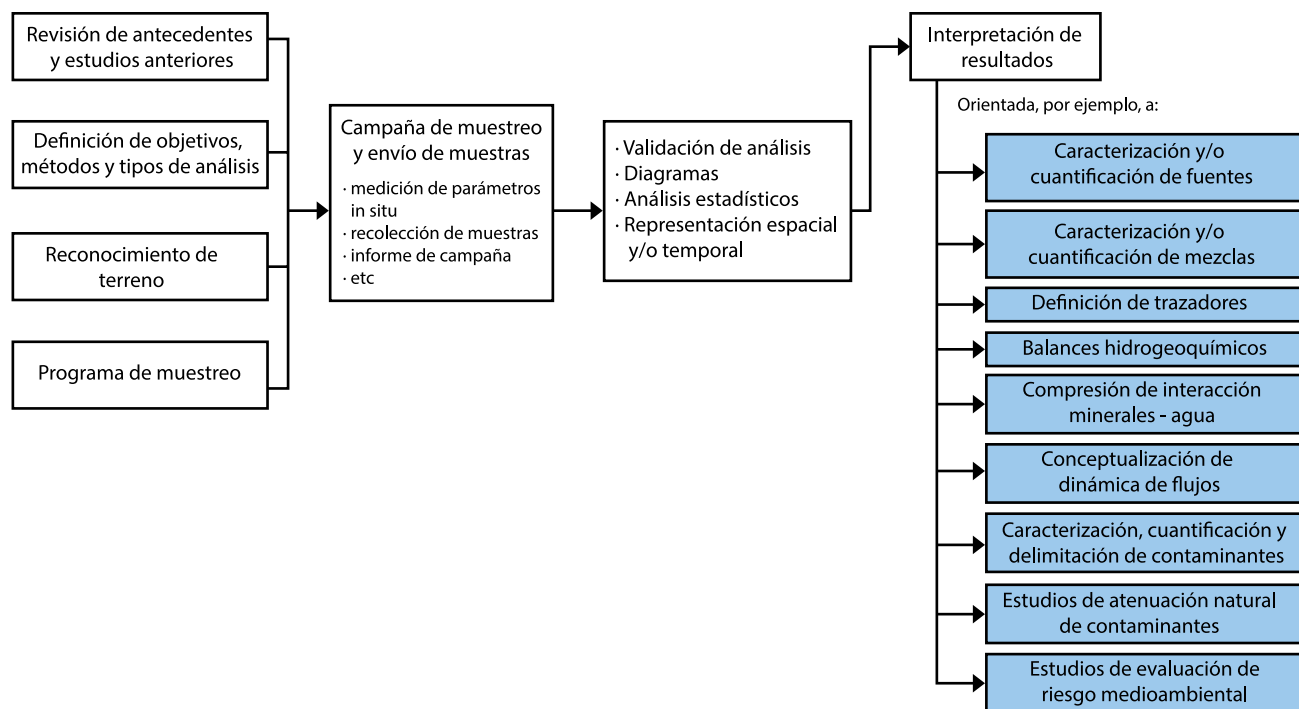


Figura 4: Flujograma recomendado para elaborar un estudio hidrogeoquímico.

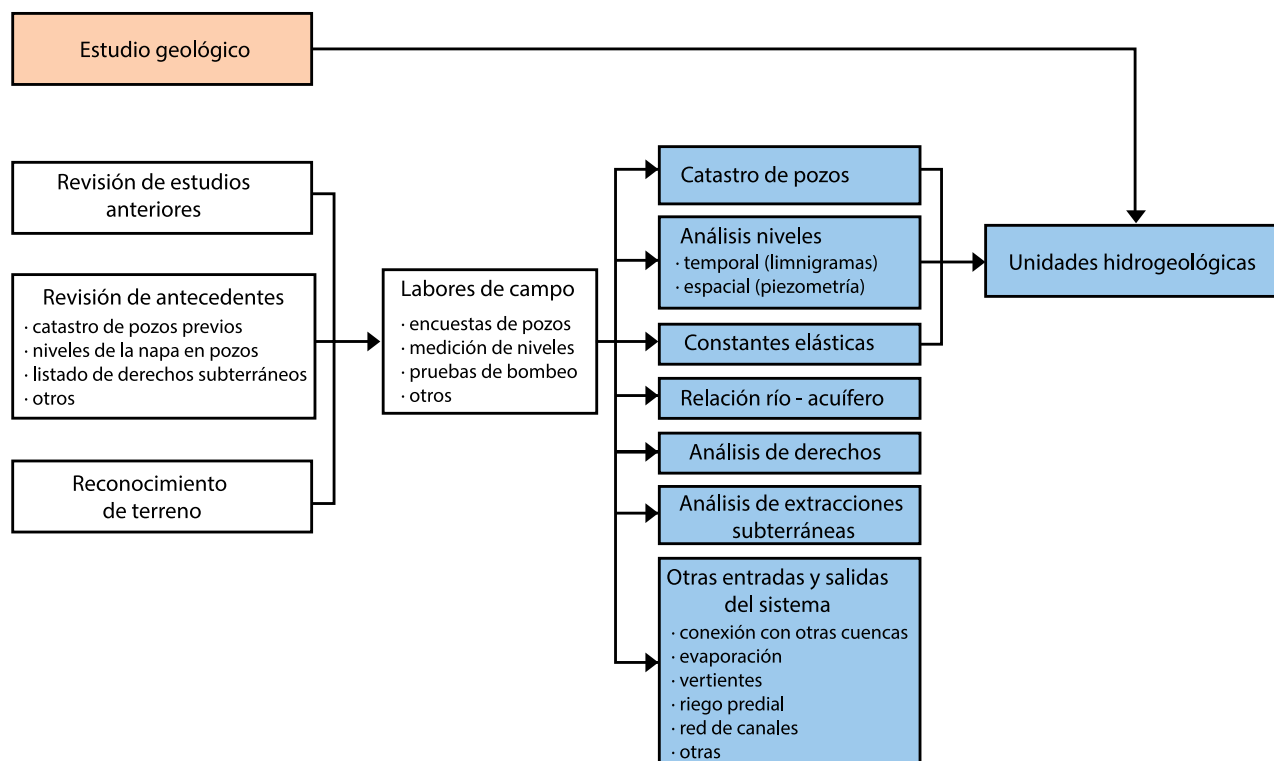


Figura 5: Flujograma recomendado para elaborar un estudio hidrogeológico.

3.2.6 Preparación del modelo conceptual

El modelo conceptual en sí mismo es la compilación e interpretación, en su conjunto, de los resultados generados a partir de la información oficial y los estudios previamente mencionados, los cuales aportan información diversa para

comprender y conceptualizar el funcionamiento hidrogeológico del sistema a modelar.

La Figura 6 representa la compilación del modelo conceptual a partir de los estudios básicos.

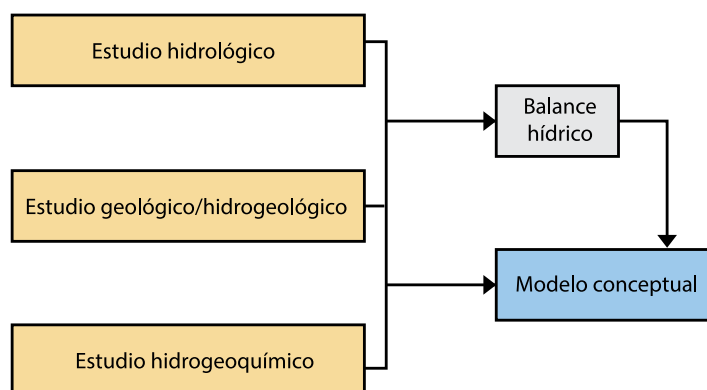


Figura 6: Flujograma recomendado para elaborar un modelo conceptual.

Los principales aspectos que se espera que el modelo conceptual permita esclarecer son:

- La geometría de las unidades hidrogeológicas y sus propiedades hidráulicas (conductividad hidráulica, coeficiente de almacenamiento y porosidad).
- La información piezométrica, su variabilidad temporal y el sentido de flujo del agua subterránea.
- Las características hidroquímicas y sus variaciones.
- Los mecanismos de recarga y descarga del sistema.
- Clasificar el o los acuíferos (libre, confinado, semiconfinado, etc.)
- Establecer un balance hídrico preliminar.

Es relevante mencionar que existe una restricción que se adopta comúnmente en la definición de los límites del sistema a modelar (geometría de las unidades hidrogeológicas). Esta se relaciona directamente con el modelo numérico, y consiste en definir límites cuyas condiciones de borde sean conocidas o simples de establecer. En general estos límites corresponden al contacto roca-relleno (condición de no flujo), aunque dependiendo de la cantidad y calidad de los datos, o de la dinámica del sistema hidrogeológico, es posible establecer límites considerando otras condiciones de borde. Un ejemplo de lo anterior corresponde a los casos en que la interacción roca-relleno, ya sea en términos de flujo o de transporte, puede resultar importante para el sistema; donde existan unidades de roca fracturada que puedan jugar un rol importante en la conducción de flujo, o donde existan interfaces salinas que actúen como límite para un acuífero de agua fresca. En general, un sistema hidrogeológico se define teniendo como base a la cuenca de drenaje superficial y en este sentido, si se limita el dominio del modelo a los rellenos sedimentarios, se debe asegurar que las interacciones roca-relleno (o límites-relleno) estén bien representadas.

Respecto de los parámetros hidráulicos que caracterizan las unidades hidrogeológicas, se debe cuidar que exista consistencia entre éstos, el tipo litológico identificado y las unidades geológicas descritas (análisis cualitativo). Además, para cada unidad hidrogeológica es importante establecer un rango teórico dentro del cual se espera que fluctúen dichos parámetros, el cual debe basarse en los valores derivados de las pruebas y ensayos de terreno y la literatura (análisis cuantitativo).

Los análisis de niveles (piezometría) entregan información fundamental para caracterizar el funcionamiento de un acuífero. Desde la perspectiva temporal, permiten entender el comportamiento y establecer tendencias, mientras que desde la perspectiva espacial son útiles para establecer la distribución, gradientes y sentido de escurrimiento. Cabe destacar que una gran debilidad detectada en las bases de datos disponibles dice relación con la confiabilidad o precisión de las cotas de terreno para pozos, por lo que se recomienda poner especial cuidado en esta variable descartando datos particulares que no sean consistentes con la piezometría o sentido de escurrimiento general del sistema.

Para modelos de flujo, el estudio hidrogeoquímico consiste en una valiosa información complementaria, ya que permite comprender con mayor certeza las dinámicas de los flujos y su interacción. En modelos de transporte este estudio es indispensable, puesto que forma parte de la línea de base de calidad del agua y entrega información acerca de procesos químicos, propiedades y otros aspectos relacionados a la dinámica de la calidad del agua. En cualquier caso, para mejorar la confianza en los resultados obtenidos de un estudio hidrogeoquímico, se recomienda realizar algún tipo de validación como por ejemplo verificar la consistencia del balance iónico.

Respecto a los diversos mecanismos de recarga y descarga es indispensable una correcta identificación y cuantificación de todos aquellos que sean relevantes, junto con la incertidumbre asociada (rango posible de variación), ya que la sostenibilidad de eventuales explotaciones en el tiempo depende en gran medida de ellos. Un factor clave reside en la justificación de los valores, en especial para la recarga, que debe estar avalada por una metodología que se ajuste a las condiciones específicas del sitio de estudio.

En todo modelo conceptual es indispensable el establecimiento de un balance hídrico que exprese los rangos esperados para los términos del balance que suelen tener mayor incertidumbre, como son las distintas entradas y salidas (recarga, evaporación, entradas subterráneas desde aguas arriba y salidas subterráneas hacia aguas abajo) y la variación del almacenamiento. En general, mientras más robustos sean los estudios básicos, más preciso resulta el balance hídrico, aunque siempre estos rangos son determinados a partir del criterio del modelador y dependen de los objetivos y alcances del proyecto.

Por último, es importante aclarar que el modelo conceptual es dinámico y está sujeto a modificaciones en la medida que se mejore el entendimiento del sistema. Asimismo, es esperable

que en algunas situaciones los resultados de las simulaciones permitan retroalimentar las conceptualizaciones realizadas en esta etapa, bajo un debido análisis y justificación.

3.2.7 Listado de información requerida

Debido a la gran cantidad de información requerida para la elaboración del modelo conceptual, resulta fundamental definir la información más relevante y la forma en que ésta debe ser presentada, de tal forma de abordar todos los aspectos esenciales.

La Tabla 4 resume los principales requerimientos de información y cuidados para la correcta elab-

boración de un modelo hidrogeológico conceptual. Se identifica la información "mínima" que debería acompañar a cualquier modelo conceptual (elementos básicos) y la información "deseable", que corresponde a información complementaria que podría requerirse en ciertos casos, en especial para modelos de alta complejidad y nivel de detalle.

Tabla 4: Listado de información requerida para la elaboración del modelo conceptual

Tema	Ítem	Tipo de requerimiento		Descripción
		Mínimo	Deseable	
Estudio Geológico	Antecedentes	X		Descripción de los antecedentes recopilados y revisados (estudios previos, cartas geológicas, estratigrafías de pozos y habilitaciones correspondientes, etc.)
	Labores de terreno	X		Resultados de trabajos de terreno realizados especialmente con ocasión del estudio (campañas geofísicas, sondajes de exploración, etc.)
	Marco geomorfológico y estructural	X		Caracterización geomorfológica y estructural a nivel regional, de preferencia acompañada por cortes esquemáticos
	Mapa geológico (de superficie)	X		Lámina (o plano) de la cobertura espacial de afloramientos consolidados y no consolidados para la escala adoptada, incluyendo estructuras si corresponde. Debe acompañar una descripción de la leyenda (ejemplo en Figura 7)
	Contacto roca - relleno	X		Límite lateral de la cubeta sedimentaria, siguiendo el contacto con las rocas supuestas impermeables (incluir lámina o plano en planta)
	Basamento rocoso	X		Límite de fondo de la cubeta sedimentaria, expresado como curvas de nivel o rangos de altitud
	Perfiles geológicos		X	Corresponde a información mínima en caso de modelos complejos. Presentar cortes diversos exponiendo la litología de sub-superficie y sus relaciones de contacto (ejemplo en Figura 7)
	Estratigrafía generalizada	X		Caracterización de los principales materiales de relleno y sus variaciones sectorizadas. Presentar una descripción de las unidades litológicas (ver Tabla 5) y esquemas de columnas estratigráficas tipo por sectores

Tema	Ítem	Tipo de requerimiento		Descripción
		Mínimo	Deseable	
Estudio Hidrológico (precipitaciones)	Identificación de necesidades	X		Señalar la importancia de la precipitación y escala temporal de los fenómenos de recarga por esta vía. En cuencas áridas la precipitación debiera ser considerada a escala diaria
	Área de estudio hidrológica	X		Definición del área para la caracterización hidrológica (típicamente cuencas hidrológicas afluentes a la zona modelada) mediante mapas y una descripción general (ejemplo en Tabla 6)
	Información meteorológica y fluviométrica	X		Identificación del tipo de información y las fuentes (ejemplo en Tabla 7). Recopilación y/o actualización de la información (presentar series de precipitaciones, escurrimientos, evaporación, entre otras variables)
	Caracterización hidrológica	X		En base a las series anteriores, caracterizar temporal y espacialmente el régimen de precipitaciones y escurrimiento, junto con el comportamiento de la evaporación
	Estimación de la recarga (metodología y resultados)	X		Conceptualización y justificación de la metodología utilizada para la estimación de la recarga por precipitación. Presentar series de recarga obtenidas y sus valores de largo plazo
Estudio Hidro-geoquímico	Antecedentes	X		Resumen de los antecedentes recopilados y revisados (estudios previos, análisis físico-químicos de aguas superficiales y subterráneas existentes, etc.)
	Métodos y tipos de análisis	X		Justificación y descripción de la metodología y tipo de análisis según los objetivos y orientación del estudio, incluyendo programas de muestreo
	Campaña de muestreo	X		Descripción de las campañas de muestreo y envío de muestras (medición de parámetros in situ, recolección de muestras, informes de campaña, etc.)
	Validación de análisis químico disponibles	X		Comprobación de la información de calidad química de las aguas obtenida de distintas fuentes (presentar balance iónico, otros métodos)
	Generación de resultados e interpretación	X		Diagramas (por ejemplo de columnas y circulares, bidimensionales de dispersión, Stiff, Schoeller-Berkaloff o Piper), análisis estadísticos y mapas hidrogeoquímicos orientados según el objetivo (caracterizar fuentes, mezclas, interacciones, establecer balances, etc.)
Estudio Hidro-geológico	Antecedentes	X		Descripción de los antecedentes recopilados y revisados (estudios previos, catastros de pozos existentes, bases de datos de niveles de la napa, pruebas de bombeo, etc.)
	Labores de terreno	X		Resultados de trabajos de terreno realizados especialmente con ocasión del estudio (encuestas de pozos, medición de niveles de la napa, aforos en canales, pruebas de bombeo, etc.)
	Catastro de pozos	X		Nómina o listado de las captaciones reconocidas en base a catastros anteriores y trabajos propios (ejemplo en Tabla 8)
	Análisis de niveles	X		Elaboración de limnigramas de pozos, es decir de la distribución de la profundidad de la napa en el tiempo. Identificación de patrones de comportamiento temporal. Desarrollo de la piezometría (curvas de igual altura piezométrica) del sector para un período determinado, indicando en un mapa el sentido del escurrimiento subterráneo

Tema	Ítem	Tipo de requerimiento		Descripción
		Mínimo	Deseable	
Estudio Hidrogeológico (continuación)	Constantes elásticas	X		Determinación de las constantes elásticas (permeabilidad y almacenamiento) en función de los antecedentes, de las pruebas de bombeo disponibles (metodologías de régimen transiente) o a través de metodologías de régimen permanente
	Unidades hidrogeológicas	X		Delimitar las distintas unidades hidrogeológicas del sistema (variación en la horizontal y en profundidad) y distribución inicial de parámetros elásticos para cada una, integrando los resultados anteriores (catastro de pozos, análisis de niveles y constantes elásticas) con los del estudio geológico de sub-superficie. La delimitación de estas unidades es imprescindible para definir las capas o estratos del futuro modelo numérico
	Relación río - acuífero		X	Corresponde a información mínima en caso de reconocerse un cuerpo superficial importante o sensible en el balance del acuífero del sector. Presentar un análisis del comportamiento del cuerpo superficial en relación con el acuífero, en función de las corridas de aforos históricas (estudios anteriores de pérdidas y recuperaciones) o mediciones propias
	Derechos subterráneos	X		Análisis de la situación de derechos de aprovechamiento subterráneo de las captaciones del sector estudiado, tanto de la demanda comprometida por la autoridad (ejemplo Tabla 9) como de la demanda total
	Extracciones subterráneas	X		Análisis de la evolución de las extracciones subterráneas históricas del sector estudiado, a través de mediciones o estimaciones justificadas
	Otras entradas y salidas del sistema	X		Identificación y cuantificación de las distintas entradas y salidas del sistema, como otras fuentes de recarga (infiltración de canales, excedentes de riego predial, ingreso subterráneo desde aguas arriba, etc.) y descargas del sistema (evaporación, vertientes, afloramientos en ríos, entre otras)
Consolidación de estudios anteriores	Delimitación de la zona a modelar	X		Delimitación clara de la zona a modelar y sus límites en un mapa de escala adecuada indicando todos los elementos relevantes para el balance hídrico (quebradas, arroyos, ríos, vertientes, lagos, humedales, salares, pozos, obras hidráulicas, etc.). Un ejemplo se aprecia en la Figura 8.
	Clasificación del o los acuíferos	X		Clasificación del tipo de acuífero (confinado, semiconfinado, libre, etc.) justificada en base a los estudios realizados
	Balance hídrico preliminar	X		Resumen del modelo conceptual. Presentar los distintos flujos considerados y un balance hídrico preliminar según lo indicado en los apartados 4.2 Flujos y 4.3 Balances de masa

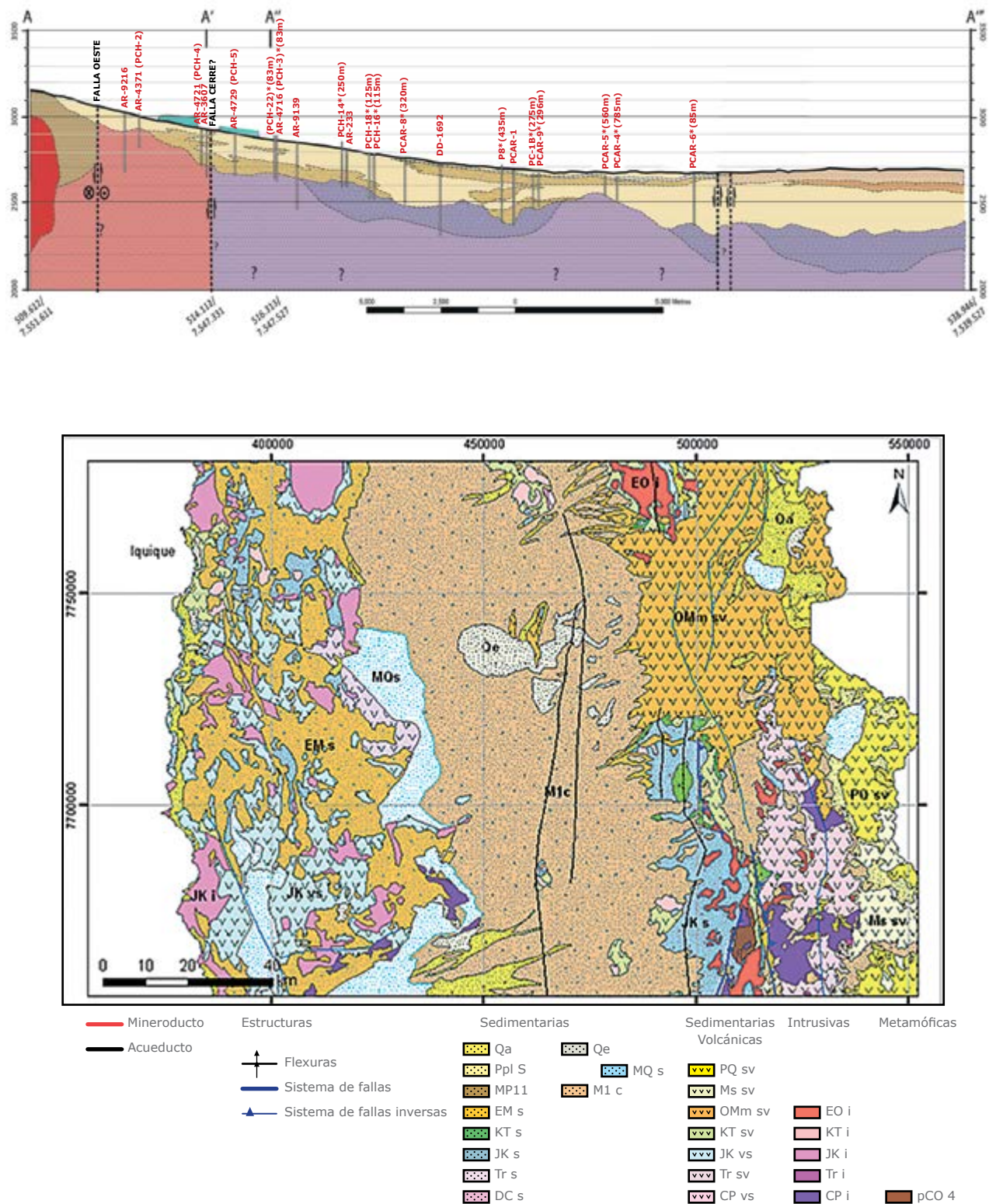


Figura 7: Ejemplo de un perfil y mapa geológico.

Tabla 5: Descripción tipo de las unidades litológicas para la confección de un modelo hidrogeológico

Grupo	Unidad litológica	Unidad geológica	Tipo de material	Hidrogeología	Espesor (m)	Edad (m.a.)	Contactos laterales	Contactos superficiales
Depósitos superficiales / Rocas sedimentarias / Rocas volcánicas	DS1 / RS4 / RV2	Tipos de depósitos, nombre de formaciones o secuencias	Depósitos fluviales / Areniscas / Lava andesítica fracturada	Acuitardo / Acuífero / Consolidado / No consolidado	50	20	N / S / E / O	Superior / Inferior

Tabla 6: Ejemplo tipo de caracterización de una cuenca hidrográfica para el desarrollo de un modelo hidrogeológico

Nombre de la cuenca	Área (km ²)	Elevación media (msnm)	Pendiente media	Orientación general (°)	Régimen hidrológico	Rango de Pp media anual (mm/año)	Rango de evaporación potencial (mm/año)	Escorrentía superficial (m ³ /s)	Uso de suelo
Cuenca Blanco	3000	328	0.03	325 (NO)	Pluvio – nival	100 - 1500	70 – 1300	50	Agrícola

Tabla 7: Descripción tipo de la información de variables hidrometeorológicas para la construcción del modelo conceptual

Variable	Estación	Vigencia	Coordenadas	Elevación	Extensión de la serie	Frecuencia	Valor medio	Valor máximo	Valor mínimo	Valores acumulados
Precipitaciones	Hornito	Suspendida	6029252 N 326391 E	1030	1/Sep/1988 - 24/Oct/2005	Diaria	-	-	-	400 (mm)
Temperatura	Saltillo	Vigente	6095836 N 310855 E	1280	Desde 3/feb/2002	Horaria	13 °C	2 °C	28 °C	-
Humedad Relativa	Saltillo	Vigente	6095836 N 310855 E	1280	Desde 3/feb/2002	Horaria	67%	98%	32%	-
Viento	Saltillo	Vigente	6095836 N 310855 E	1280	Desde 3/feb/2002	Subhoraria	2,8 (m/s)	0 (m/s)	12 (m/s)	-
Caudales	Río Blanco en Junta	Vigente	6062544 N 341927 E	874	Desde 16/May/1995	Diaria	40 m ³ /s	52 m ³ /s	27 m ³ /s	-

Tabla 8: Encabezado tipo para el catastro de pozos

Nombre	Propietario	Predio	Ubicación					Características constructivas			Prueba de bombeo			
			Este (m)	Norte (m)	Huso	Datum	Cota de terreno (m)	Diámetro (pulg.)	Profundidad de perforación (m)	Profundidad de habilitación (m)	Nivel estático (m)	Caudal estabilizado (l/s)	Nivel dinámico estabilizado (m)	Fecha
Pozo A1	Compañía XX	Fundo Nogal	350443.96	6295404.38	19	WGS84	590	14	85	30	470	3	(m) 458	3/Mar/2006

Tabla 9: Encabezado tipo para el catastro de derechos de aprovechamiento

Expediente	Ubicación				Características del derecho					
	Este	Norte	Huso	Datum	Fecha de ingreso	Caudal solicitado (l/s)	Caudal otorgado (m/s)	Uso	Nº de resolución	Fecha de resolución
ND – 0901 - 2944	308635.70	6064764.13	19	WGS84	19/Ago/2001	10	7	Agrícola	221	2/Ene/2003

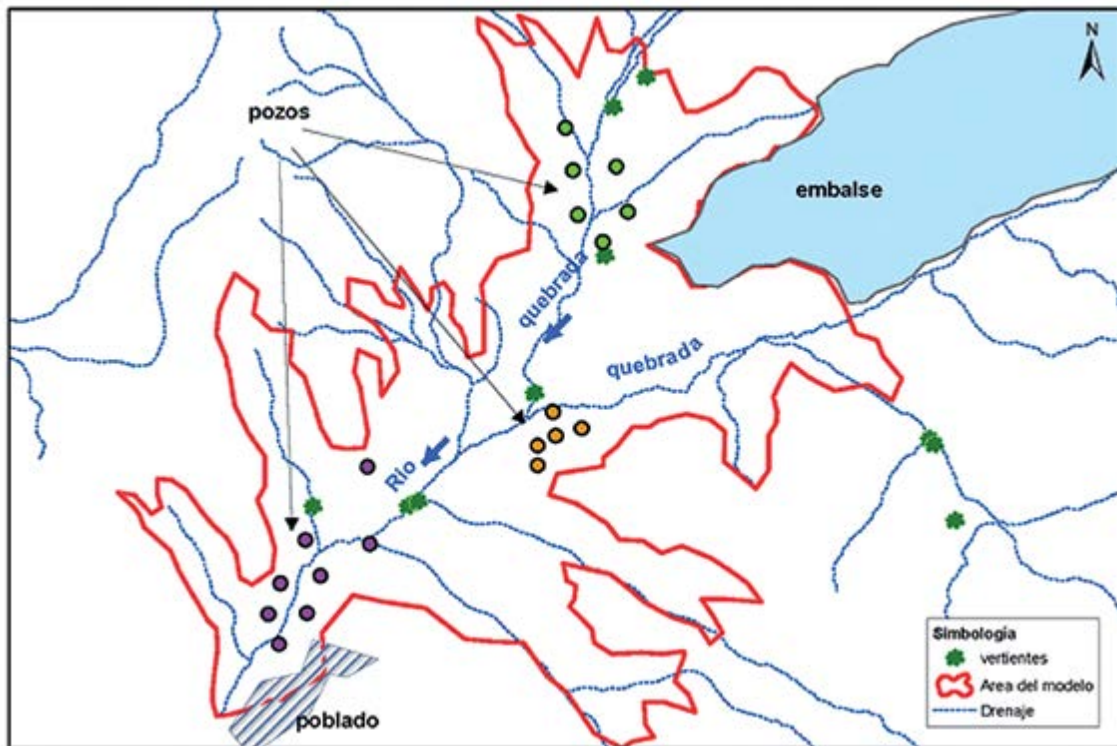


Figura 8: Esquematización conceptual de una zona de estudio.

3.3 MODELO NUMÉRICO

El siguiente paso en el desarrollo de un modelo hidrogeológico se refiere a la representación del modelo conceptual por medio del modelo numérico. La conceptualización del sistema acuífero permite disponer de un marco simplificado, pero aún continuo y con los elementos reales del sistema hidrogeológico, tales como ríos, límites hidrológicos y/o geológicos, tasas de precipitación, entre otros. En esta etapa es necesario representar dichos elementos en el modelo numérico, lo cual requiere discretizar el área de estudio y el tiempo, distribuyendo espacialmente los parámetros de los distintos fenómenos que gobiernan el flujo y transporte de las aguas subterráneas e incluyendo algunas características particulares del funcionamiento del acuífero mediante condiciones de borde.

Los atributos básicos que se deben definir en la construcción del modelo numérico son:

- Límites y geometría del área o dominio de modelación.
- Nivel de detalle de la discretización.
- Tipo de modelo (régimen permanente o transiente) y atributos en relación al tiempo.
- Condiciones de borde y condiciones iniciales.
- Tasas de recarga y otros flujos de entrada/salida.
- Asignación de parámetros al modelo (parámetros de flujo y transporte).
- Selección de pozos de observación y series de datos asociadas.

3.3.1 Límites del dominio de modelación

El dominio o área de modelación es un sub-dominio del sitio de estudio y queda definido por las zonas donde ocurren los procesos que se quieren analizar. Los límites del dominio activo de modelación deben abarcar estas zonas y trazarse de acuerdo al conocimiento confiable del comportamiento hidráulico del sistema, de tal forma que los límites puedan ser representados mediante condiciones de borde conocidas o simples de establecer.

Al momento de definir dicho dominio, es importante especificar claramente los límites en base a la siguiente distinción:

- Límite superior o techo.
- Límite inferior o piso.
- Límites laterales o contactos laterales.

El límite superior coincide normalmente con el nivel de la superficie del terreno, el cual puede derivarse de modelos de elevación digital, curvas de nivel o levantamientos topográficos, aunque para acuíferos confinados podría referirse al contacto con el estrato confinante.

El límite inferior y los contactos laterales se escogen típicamente siguiendo el contacto roca-relleno -que representa una condición de no flujo-, aunque métodos geofísicos y análisis de niveles permiten también estimar el comportamiento y variabilidad de los flujos, asociándolos a otros tipos de condiciones de borde¹¹.

3.3.2 Definición de la grilla y discretización horizontal

Una cuidadosa definición de la extensión y orientación de la grilla permite simplificar el análisis, mejorar la precisión de los resultados y contribuir a la convergencia y estabilidad numérica.

Para los *software* basados en el método de elementos finitos se recomienda aprovechar al máximo la facilidad de representar el sistema de aguas subterráneas a través de un mallado flexible, considerando una mayor densificación o detalle (malla más fina) en las zonas donde se encuentran los sistemas ambientales sensibles (objetos de protección) o donde se esperan mayores gradientes hidráulicos.

Para los *software* basados en el método de diferencias finitas una buena elección de la grilla tiene mayor importancia, dado que por su naturaleza el dominio generado estará compuesto por sub-dominios rectangulares, por lo cual, si se quiere representar los límites del modelo con mayor detalle, será necesario una discretización más fina.

Es importante tener presente que si bien una grilla más densa contribuye a generar resulta-

dos más precisos, esto acrecienta el tiempo de cálculo y puede volver la modelación poco práctica. De esta forma, la elección de la discretización horizontal debe realizarse buscando un balance entre estos dos aspectos, para lo cual se recomienda considerar los siguientes puntos:

- Objetivos de la modelación.
- Heterogeneidad e isotropía del acuífero.
- Ubicación de fuentes, sumideros, zonas con altos gradientes y zonas sensibles ambientalmente.
- Esfuerzo computacional.
- Resolución deseada para los resultados.

Durante el proceso de calibración y validación, así como durante la operación del modelo, es posible refinar la malla original para analizar el efecto que esta acción tiene sobre la solución numérica. Un nivel de discretización óptimo de la malla se logra en el punto en que una mayor resolución no produce cambios significativos en los resultados ya obtenidos.

Algunos criterios comunes que se consideran al momento de definir la orientación y resolución de la grilla pueden encontrarse en el documento Anexo¹².

¹¹ Ver apartado 3.2.6 Preparación del modelo conceptual.

¹² Ver Anexo A4.

3.3.3 Definición de la discretización vertical

La discretización vertical del modelo se realiza ingresando las distintas superficies que definen las capas o *layers*, las cuales deberían reflejar el número de estratos considerados en el modelo conceptual.

En cuanto a la discretización en el límite superior es importante destacar que, para la mayoría de los casos (en particular aquellos con los niveles freáticos o piezométricos profundos), precisiones de la topografía en torno a 1 metro resultan aceptables. Un caso particular corresponde a acuíferos someros donde la evaporación¹³ desde la napa y/o la evapotranspiración vegetal forman parte importante del balance hídrico (por ejemplo, acuíferos someros en zonas áridas o en salares) y en donde la topografía debería ser representada con una precisión del orden de centímetros. En cualquier caso es recomendable trabajar a partir de la información base en un área levemente mayor al dominio total del modelo, con la finalidad de evitar condicionar la topografía por efectos de borde producto de la interpolación.

La superficie inferior, o piso del modelo, queda usualmente definida por el basamento rocoso

impermeable o algún estrato de baja permeabilidad, mientras que las superficies intermedias corresponden a los contactos entre los distintos estratos considerados.

Mucha precaución debe tenerse con una correcta definición de la discretización en las capas superiores del modelo, de tal forma de evitar un problema común que puede ocurrir al utilizar *software* basados en el código MODFLOW, que consiste en el secado de celdas, que generalmente se produce en los bordes del modelo, y que inactiva las celdas secas durante el resto de la simulación¹⁴. Para lidiar con dicho problema se puede aplicar una variedad de estrategias, cada una con sus respectivas ventajas y desventajas, las cuales deben ser evaluadas caso a caso para determinar las mejores opciones¹⁵. En cualquier caso, dicho problema debe ser abordado y la calidad de la solución implementada puede ser evaluada a la hora de comparar el ingreso impuesto de recarga y la recarga leída por el modelo (ver Figura 20).

Por último, cabe mencionar que un criterio de verificación útil para evitar inconsistencias en la definición completa de la grilla consiste en confirmar la conexión de todas las celdas del modelo numérico.

3.3.4 Tipo de modelo en relación a la dinámica temporal

Para definir el tipo de régimen más adecuado para simular el comportamiento del sistema hidrogeológico, se deben tener presentes tanto las características propias del sistema, como los objetivos de la modelación.

Una modelación en régimen permanente resulta adecuada para representar sistemas acuíferos donde los flujos dentro del sistema, tanto naturales como producto de actividades antrópicas, no varían significativamente y cuando el objetivo de la modelación consiste en estimar condiciones medias de largo plazo.

Una modelación en régimen transiente es la única forma adecuada para representar sistemas acuíferos dinámicos, donde los flujos cambian significativamente en el tiempo -ya sea estacionalmente y/o con aumentos o descensos sostenidos- y cuando el objetivo de la modelación consiste en simular períodos sobre los cuales existen intervenciones temporales en el siste-

ma, como cambios en la operación de pozos, en la magnitud de la recarga, etc.

Es importante destacar que existen sistemas dinámicos donde nunca se alcanza una condición permanente y que sólo pueden ser representados mediante modelos en régimen transiente. Lo anterior es usual en cuencas de alta montaña donde la variabilidad hidrológica y los pronunciados gradientes pueden impedir la existencia de un estado estacionario, y se traducen en fluctuaciones de los niveles de la napa entre condiciones húmedas y secas.

Por otra parte, es frecuente que los modelos de transporte se corran acoplados al respectivo modelo de flujo en régimen permanente, dado que los efectos sobre la calidad del agua se perciben típicamente a largo plazo y, por tanto, la estacionalidad -en términos de cambios en las condiciones de flujo (velocidades por ejemplo)- pierde relevancia.

¹³ La evaporación es un mecanismo de descarga que depende, entre otros, de la profundidad de la napa respecto al terreno.

¹⁴ El secado de celdas puede desviar considerablemente el balance hídrico, ya que una vez que una celda queda seca, la eventual recarga o extracción posterior se pierde. A pesar que en algunos *software* existe la opción de rehumedecimiento (o *rewetting*), debe ser usada con precaución, pues en modelos complejos podría generar inestabilidades y problemas de convergencia.

¹⁵ Un método útil consiste en establecer un espesor mínimo para el modelo (por ejemplo un 10% a 20% del espesor medio), aunque presenta la desventaja de que se podría perder representatividad de la geometría utilizada en el modelo conceptual.

3.3.5 Intervalo de tiempo y horizonte de simulación

El intervalo de tiempo considerado en la modelación¹⁶ depende de los objetivos de ésta (por ejemplo corto plazo o largo plazo) y de los fenómenos que se desea representar (algunos tienen carácter estacional mientras que otros no). Típicamente las simulaciones de flujo se presentan a escala diaria, aunque para modelos de largo plazo puede bastar con una periodicidad semanal e incluso mensual. En modelos de transporte los efectos de la estacionalidad son menos relevantes y las simulaciones pueden realizarse a partir de información media anual, según sea el caso.

En ocasiones resulta también adecuado definir intervalos de tiempo no homogéneos, por

ejemplo más pequeños al comienzo de los periodos de *stress*, con el objetivo de simular de forma más detallada los primeros instantes en simulaciones transientes.

En términos del horizonte de tiempo, éste depende también de los objetivos de la simulación y de los fenómenos que se desea representar. En el caso que existan fenómenos con una marcada estacionalidad natural y que afecten la dinámica de los sistemas acuíferos, se recomienda considerar un horizonte de al menos 1 año, basado en información mensual¹⁷. Lo anterior cobra mayor relevancia cuando se consideran perturbaciones antrópicas susceptibles de afectar dichas dinámicas estacionales.

3.3.6 Condiciones de borde

El tipo de condición de borde debe ser definido en concordancia a la dinámica del sistema, establecida en el modelo conceptual. Su elección es de suma importancia en la construcción de un modelo hidrogeológico, dado que permite definir los límites físicos del dominio de modelación y, además, fija aspectos clave que inciden en su comportamiento.

Para efectos de esta Guía se clasifican las condiciones de borde para un modelo de flujo en dos categorías:

- Condiciones impuestas: el modelador ingresa directamente los flujos al sistema.
- Condiciones calculadas: el modelo estima los flujos a partir de variables dependientes y otros parámetros.

La Tabla 10 presenta los tipos de condiciones de borde¹⁸ y recomendaciones sobre cuándo aplicarlas.

¹⁶ Este intervalo de tiempo no tiene relación directa con la discretización temporal que utiliza el *software* para realizar los cálculos, que depende de criterios de convergencia y estabilidad numérica.

¹⁷ Existen fenómenos particulares que pueden requerir información a nivel diario, e incluso horario, por ejemplo lluvias en zonas áridas como las cuencas del altiplano.

¹⁸ Fenómenos como extracción e inyección a través de pozos, recargas o evapotranspiración, no constituyen una condición de borde por sí mismas. Sin embargo, en la práctica son comúnmente tratados como condiciones de borde por lo que se incluyen como tales en esta Guía.

Tabla 10: Condiciones de borde

Tipo	Condición de borde	Aplicación
Impuesta	No flujo	Contacto roca - relleno, divisorias de agua estáticas
	Recarga	Recarga superficial por precipitación y cuerpos de agua superficiales. Recarga lateral proveniente de quebradas y cuencas vecinas
	Pozos	Inyecciones o extracciones puntuales
Calculada por el modelo	Altura conocida	Niveles piezométricos con amplios registros, aplicabilidad limitada para representar objetos de protección ambiental
	Carga general	Acotar los límites del dominio activo de modelación mediante su vinculación con una condición de borde externa conocida
	Río	Cauces naturales principales que escurren en estrecha relación con el acuífero, alternando sectores de pérdidas y ganancias
	Dren	Quebradas naturales, vertientes (afloramientos), galerías y obras artificiales
	Lago	Grandes cuerpos de agua con periodos de retención relativamente largos
	Arroyo	Pequeños cauces con alta variabilidad hidrológica (útil para estimar propiedades del flujo y caudal ecológico)
	Evapotranspiración	Acuíferos someros en ambientes secos, cuencas endorreicas (salares, pajonales y vegas)
Transporte	Concentración conocida	Mediciones y registro amplio de las concentraciones
	Concentración de recarga	Concentraciones asociadas a un flujo de entrada de caudal conocido
	Concentración de descarga	Concentraciones asociadas a un flujo de salida de caudal conocido
	Fuente puntual	Concentraciones en los flujos de entrada o salida asociados a distintas condiciones de borde

Para el uso de cualquier condición de borde se debe verificar siempre que los flujos asociados mantengan consistencia con los flujos del modelo conceptual. Además, se debe evitar superponer condiciones de borde en una misma celda, ya que algunas son incompatibles entre sí, por ejemplo “pozos” en celdas de “altura conocida”.

Para la evaluación de impactos ambientales, es de suma importancia tener presente los siguientes aspectos relacionados a las condiciones de borde¹⁹:

- **Especial cuidado se requiere al definir bordes con la condición de altura conocida, ya que éstos pueden convertirse en fuentes o sumideros infinitos de agua. Por ello, al utilizar este tipo de condición de**

borde se recomienda llevar cabo una inspección del balance hídrico para verificar que no se produzcan las situaciones mencionadas. Esta condición de borde nunca debería ser utilizada para representar un sistema ambiental sensible ni vertientes alimentadas por aguas subterráneas.

- **El uso de la condición de arroyo es especialmente adecuado cuando existen o se esperan variaciones significativas en las condiciones hidrológicas o niveles del cauce, por ejemplo, cuando interesa evaluar el caudal ecológico.**
- **La curva asociada a la condición de evapotranspiración debe ser representada a través de múltiples segmentos rectos. Se debe evi-**

¹⁹ Las recomendaciones que siguen se abordan con mayor profundidad en el Anexo A5.

tar modelar la evapotranspiración mediante la aproximación de una única recta, ya que esto sobrestima en demasía su magnitud y se puede incurrir en errores significativos.

- En el caso de vertientes, un caso común y de gran relevancia consiste en aquellos manantiales de agua subterránea que alimentan lagunas en el borde de salares, en cuencas endorreicas del altiplano. La condición de borde recomendada en esta situación es la del tipo dren, con una altura de descarga correspondiente a la cota de terreno del alumbramiento. Esta recomendación puede aplicarse a múltiples casos en relación a vertientes.
- En el caso de lagunas en estrecha conexión con el acuífero, para simular extracciones cercanas no deberían escogerse condiciones de borde que impongan el nivel del agua. En estos casos se recomienda escoger una condición de borde tipo lago, o simplemente no utilizar ninguna condición de borde, lo cual corresponde a un criterio conservador desde el punto de vista ambiental.
- Para salares, pajonales y vegas, es importante tener especial cuidado en la

definición de las áreas de evapotranspiración y llevar a cabo una determinación precisa de la topografía en éstas (precisión del orden de centímetros).

- En cauces naturales importantes que escurren en estrecha relación con el acuífero, puede ser relevante para el comportamiento del acuífero simular correctamente la interacción río – acuífero (determinar sectores de infiltración y afloramiento y cuantificar su magnitud). Para esto se puede utilizar la condición de borde de río, teniendo en cuenta que ello requiere de un registro histórico (caudales y niveles) que permita evaluar estas interacciones con un sólido respaldo técnico.

Dada la importancia de las condiciones de borde en la construcción de un modelo hidrogeológico, es altamente recomendable realizar una verificación de que éstas se encuentren correctamente representadas en el modelo numérico²⁰, en especial las condiciones que conllevan recargas o extracciones de agua. Esto puede realizarse mediante un simple análisis gráfico, lo cual se presenta en detalle más adelante²¹.

3.3.7 Condiciones iniciales

Para simulaciones transientes es necesario definir una condición inicial y especificar el respectivo período de estabilización o *start up* requerido. Este último corresponde al tiempo necesario para que los resultados obtenidos de la simulación sean coherentes e independientes de las condiciones iniciales definidas.

Si bien la condición inicial puede derivarse de mediciones de terreno, esto es poco práctico si se tiene en cuenta la necesidad de un período de estabilización inicial. Debido a lo anterior, se recomienda simular primero el régimen permanente y utilizar su resultado como condición inicial para simular el régimen transiente. En cualquier caso, sólo pueden ser considerados como resultados válidos aquellos que se obtienen una vez transcurrido el período de estabilización.

3.3.8 Recarga del acuífero y extracciones

Tanto la recarga como las extracciones corresponden a condiciones de borde del tipo “impuestas” (ver Tabla 10).

La cuantificación de la recarga del acuífero se deriva de los estudios hidrológico e hidrogeológico. La recarga puede ser natural o artificial y se ingresa como una serie definida por períodos de *stress* y distribuida espacialmente de acuerdo

a la zonificación determinada en el modelo conceptual. Las series de recarga incorporadas en un modelo numérico corresponden normalmente a tasas de recarga (unidades de longitud/tiempo, por ejemplo mm/año), por lo cual, cuando se tienen caudales de recarga (unidades de volumen/tiempo, por ejemplo l/s), es necesario calcular las tasas de recarga a partir del área transversal de las celdas por las cuales pasa el flujo.

²⁰ Aún si las condiciones se encuentran correctamente ingresadas, pueden producirse diferencias durante las simulaciones, por ejemplo por el secado de celdas u otros aspectos particulares de la modelación numérica.

²¹ Ver apartado 4.2.3 Flujos en las condiciones de borde.

La determinación de las extracciones (su monto y variabilidad temporal) se lleva a cabo en el estudio hidrogeológico y se ingresan, al igual que la recar-

ga, como series definidas por períodos de *stress* y distribuidas espacialmente de acuerdo a la zonificación determinada en el modelo conceptual.

3.3.9 Asignación de parámetros al modelo de flujo y de transporte

Los rangos de valores estimados para dichos parámetros se determinan en el modelo conceptual. En principio, es preferible ingresar al modelo numérico los valores medios dentro del rango posible de variación, de tal forma de disponer de holgura suficiente para variar estos parámetros en la posterior etapa de calibración.

Para incorporarlos al modelo se pueden utilizar *software* de información geográfica desde donde son importados, aunque es posible también ingresar los valores celda a celda o por sectores preestablecidos. Dada la alta heterogeneidad de estos parámetros, es útil zonificarlos a partir de lo establecido en el modelo conceptual.

3.3.10 Preparación de observaciones para el ajuste del modelo

Las observaciones son parte fundamental del modelo numérico, ya que sirven para evaluar el ajuste del modelo durante el proceso de calibración y validación.

Las observaciones para el modelo de flujo corresponden a los niveles piezométricos, asociados a cada pozo de observación y a la piezometría, dada por la superficie generada por el conjunto de niveles piezométricos. Esta última debe ser considerada para ajustar; además de los niveles individuales observados, el comportamiento general de los flujos.

La ubicación de los pozos de observación es fundamental a la hora de contar con observaciones representativas y de calidad. Algunos criterios que deberían cumplir los pozos que sean seleccionados como pozos de observación son:

- Estar presentes dentro del dominio activo.
- Presentar registros lo más completos posible dentro del período de calibración.
- Tener una cota o elevación del nivel de terreno confiable.
- Conocer la profundidad de su lectura para poder relacionar a un *layer* en el modelo con un nivel de confiabilidad adecuado.
- Presentar niveles de agua subterránea consistentes con la piezometría y el funcionamiento del acuífero.

Las características que se requieren para ingresar las observaciones al modelo son el nivel de agua subterránea (cota), ubicación y *layer* asociado a cada observación teniendo la precaución

de no confundir la cota de terreno con la cota del pozo, que incluye el *stick up* o sobresaliente. Se debe tener presente también que, dado que usualmente lo que se conoce es la profundidad de los niveles, es de gran relevancia disponer de la cota de terreno con precisión, con el objetivo de estimar correctamente la cota de los niveles. Medidas de precisión pueden ser obtenidas mediante estudios topográficos, GPS diferencial, entre otros.

En cuanto al modelo de transporte, las observaciones corresponden a concentraciones. Éstas comparten las mismas características que las observaciones de los niveles piezométricos, salvo que en este caso la cota de terreno no es tan importante y la entrada de datos incluye las series de concentraciones registradas.

Un caso particular es el de los pozos de extracción. Un pozo de extracción representa una salida de agua del sistema, pero no permite obtener información acerca de las concentraciones. En este caso se recomienda incluir un pozo de observación de concentración inmediatamente al lado del pozo de bombeo, de tal forma de conocer la calidad química del agua bombeada.

Antes de ingresar las series de observaciones al modelo, ya sean de niveles o concentraciones, se recomienda encarecidamente realizar un control de calidad de los datos respecto de inconsistencias producto de errores instrumentales, errores en la lectura, en el registro de las mediciones u otras fuentes de error.

3.3.11 Listado de información requerida

La Tabla 11 resume los principales requerimientos de información y cuidados para una correcta representación del modelo hidrogeológico conceptual a través del modelo numérico. Se identifica la información “mínima” que debería acom-

pañar a cualquier modelo numérico (elementos básicos) y la información “deseable” que corresponde a información complementaria que podría requerirse en ciertos casos, en especial para modelos de alta complejidad y nivel de detalle.

Tabla 11: Listado de información requerida para la elaboración del modelo numérico

Tema	Ítem	Tipo de requerimiento		Descripción
		Mínimo	Deseable	
Límites y Geometría	Tamaño y orientación de la malla	X		Coordenadas de los vértices del área de modelación. Mapa donde se aprecie el ángulo y sentido de rotación si aplica, junto con su respaldo técnico
	Refinamiento y número de estratos	X		Patrón de refinamiento de la malla (n° de filas y n° de columnas), dimensiones de las celdas y su respaldo técnico. Indicar número de estratos o capas modeladas y demostrar su equivalencia con las unidades hidrogeológicas reconocidas en el modelo conceptual
	Bordes laterales	X		Demostrar consistencia de los límites laterales del modelo numérico con el contacto roca – relleno (u otra condición) adoptado en el modelo conceptual (mostrar en figuras en planta)
	Forma de los estratos o capas	X		Demostrar consistencia con la(s) unidad(es) hidrogeológicas definidas en el modelo conceptual, en particular del piso del modelo y su correspondencia con el basamento rocoso (u otra condición de borde) Caso particular constituye el techo del modelo cuando equivale al nivel de terreno, siendo deseable en general una buena representación de la superficie del suelo (en particular si la evaporación es relevante se recomienda una precisión del orden de centímetros). Indicar precisión de la topografía utilizada
Atributos en relación al tiempo	Tipo de régimen	X		Señalar régimen permanente o transiente acompañado de una justificación de la elección
	Resolución temporal y horizonte	X		Tipo permanente: especificar período asociado y condiciones (por ejemplo largo plazo sin extracciones artificiales) Tipo transiente: especificar período modelado (fecha inicio - fecha fin) y resolución temporal (por ejemplo a nivel mensual)
	Períodos de stress		X	Tipo transiente: tabla de los períodos de <i>stress</i> , especificando tiempo de inicio y fin para cada uno
Condiciones de borde	Impuestas (recarga y extracciones)	X		Describir todos los mecanismos de entradas (recarga superficial y recarga lateral) y salidas (pozos de extracción) impuestos al modelo como caudal o lámina de agua, incluyendo los valores adoptados (series), apoyándose en tablas, gráficos y láminas de ubicación
	Calculadas por el modelo (altura conocida, dren, río, evaporación, etc.)	X		Describir todas las condiciones de borde calculadas por el modelo que forman parte del mismo. Indicar el componente que representa cada una del balance hídrico conceptual (si corresponde), acompañado de tablas, gráficos y láminas de ubicación
Condición inicial	Condición inicial	X		Descripción de la condición inicial utilizada (relevante sólo para régimen transiente)
Parámetros del modelo numérico	Parámetros de flujo y de transporte	X		Presentar la distribución espacial de conductividad hidráulica (permeabilidad), coeficiente de almacenamiento, porosidad y dispersividad, demostrando consistencia con el modelo conceptual en cada estrato o unidad hidrogeológica reconocida
Pozos de observación	Pozos de observación	X		Indicar los criterios de selección de los pozos de observación del modelo. Incluir listado de los puntos de control con su identificación, coordenadas, tipo de medición (nivel, concentración), unidad hidrogeológica representativa y sus principales características constructivas
Incorporación de áreas de balance	Definición de áreas de balance local		X	Delimitar las áreas definidas para computar un balance hídrico local. El objetivo es conocer los flujos de entrada y salida producto de diversos mecanismos en un sector en particular (balance local)

Luego de la construcción del modelo numérico se debe realizar un proceso de ajuste en los parámetros, el cual permite representar de buena forma las condiciones observadas en el sistema acuífero real aumentando la confiabi-

lidad en la capacidad predictiva del modelo. Este proceso comprende las etapas de calibración y validación, luego de las cuales recién cobra sentido llevar a cabo las simulaciones con fines predictivos.

3.4.1 Asignación de datos para calibración y validación

Tanto la calibración como la validación requieren de un conjunto de observaciones²² para evaluar el ajuste de las variables simuladas, siendo importante que ambos conjuntos sean independientes y deseable que estén asociados a distintas condiciones hidrológicas.

Normalmente se dispone de una cantidad de registros limitada para llevar a cabo la calibración y validación, por lo que resulta relevante realizar una asignación óptima de éstos con el fin de lograr el mejor ajuste posible. Para ello, se presentan los siguientes criterios de decisión:

- **Cuando se dispone de un registro de observaciones mayor a 10 años de extensión, se recomienda utilizar un 70% de éstos para la calibración y un 30% para la validación.**

- **Para registros entre 5 y 10 años de extensión, se recomienda seguir el mismo criterio anterior, pero sujeto a establecer un Plan de Seguimiento de las Variables Ambientales de mayor alcance (mayor número de pozos y frecuencia de monitoreo).**

- **Cuando se dispone de menos de 5 años de registro de observaciones, se recomienda utilizar todos los datos para la calibración (prescindir de la validación), pero sujeto a la realización de un acabado análisis de sensibilidad para estimar la incertidumbre de las predicciones, además de presentar un Plan de Seguimiento de las Variables Ambientales de mayor alcance.**

3.4.2 Calibración

La calibración consiste en la variación sistemática de ciertos parámetros del modelo con el objetivo de reproducir las variables observadas, que corresponden usualmente a los niveles piezométricos (en el caso de modelos de flujo) y a concentraciones (en el caso de modelos de transporte). Si bien en algunos casos los resultados de

este proceso permiten acotar mejor los datos de entrada del modelo (por ejemplo, la distribución espacial y temporal de la recarga y la evaporación), lo anterior corresponde, en realidad, a una modificación en el modelo conceptual y dichas modificaciones se considera que no forman parte de los parámetros de la calibración.

Parámetros

Debe tenerse presente que involucrar un mayor número de parámetros en la calibración se traduce en un modelo más susceptible a reproducir los mismos resultados bajo distintas combinaciones de parámetros, acentuando así el problema de la *no unicidad*. Ante esto, una cuidadosa selección de los parámetros a calibrar cobra relevancia puesto que al seguir el principio de parsimonia²³ se puede reducir el grado de *no unicidad*, y lograr resultados de la calibración más confiables (UNC, 2005).

Los parámetros utilizados dependen del modelo que se quiera calibrar, sea este de flujo o de transporte. En un modelo de flujo se consideran normalmente los siguientes parámetros:

- **Conductividad hidráulica.** Los valores deben mantenerse dentro de rangos realistas determinados en el modelo conceptual, respetando consistencia con la interpretación geológica²⁴. Los valores iniciales pueden ser los obtenidos en pruebas de bombeo (en caso de existir), o en su defecto a partir de la literatura para

²² Ver apartado 3.3.10 Preparación de observaciones para el ajuste del modelo.

²³ Se debería considerar el mínimo de parámetros que permitan llevar a cabo la calibración, con énfasis en aquellos con mayor incertidumbre y ante los cuales el modelo sea sensible.

²⁴ Rangos comunes de referencia según tipo de roca o relleno se encuentran en el Anexo A1.

el tipo de material definido en el estudio geológico. La distribución debe ser acorde a las unidades hidrogeológicas establecidas en el modelo conceptual.

- Porosidad de drenaje y coeficiente de almacenamiento específico. Caso análogo al de la conductividad hidráulica, salvo que las pruebas de bombeo son normalmente poco representativas (generan valores de corta duración, sólo válidos como una estimación de la cota inferior), por lo que se recomienda adoptar valores y rangos acordes a la literatura para el tipo de material definido en el estudio geológico²⁵.
- Distribución de las tasas de recarga superficial y caudales de recarga lateral. Se debe tener presente que los mecanismos de recarga y la magnitud de éstos (tasas de recarga superficial y caudales de recarga lateral) se definen/estiman durante el desarrollo del modelo conceptual.
- Parámetros que rigen el funcionamiento de las condiciones de borde. Se debe tener presente que el tipo de condición de borde se define durante el desarrollo del modelo conceptual, en concordancia a la dinámica del sistema acuífero establecida en dicha etapa.

En los modelos de transporte se requiere normalmente como insumo el campo de velocidades obtenido a partir del modelo de flujo²⁶, por lo que la calibración de un modelo de transporte significará un proceso iterativo que involucrará también cambios en el modelo de flujo. En este

caso los parámetros susceptibles de ser calibrados son los ya mencionados para el modelo de flujo, además de los siguientes específicos del modelo de transporte:

- Parámetros de transporte: dispersividad (longitudinal y transversal), coeficiente de difusión, coeficiente de adsorción y tasa de degradación.
- Ubicación de fuente. Cuando el modelo conceptual no permite identificar el origen de la fuente de la sustancia modelada, es posible calibrar su ubicación. En casos que se tengan distintas fuentes puntuales cercanas de ubicación indeterminada, puede ser preferible adoptar una distribución espacial como fuente contaminante.
- Historia de la fuente. Se refiere a cómo han sido las descargas en el tiempo. Cuando no se tienen antecedentes al respecto, se puede realizar una calibración para estimar cuándo éstas se produjeron y cuánto han sido los caudales máximos asociados.

El rango de variación aceptado para cada parámetro debe definirse en esta etapa y debería situarse siempre dentro de límites realistas determinados en el modelo conceptual.

Los valores iniciales pueden obtenerse de pruebas en terreno o a partir de valores de referencia definidos en la literatura especializada para el tipo de material de la unidad hidrogeológica correspondiente, según sea el caso.

Metodología para modelos de flujo

Existe consenso respecto de que no existe una metodología universal para calibrar un modelo, ya que la alta complejidad inherente a los sistemas hidrogeológicos obliga a analizar cada problema en forma particular, dejando gran parte del trabajo al juicio y a la experiencia del modelador. Sin perjuicio de lo anterior, se reconocen dos enfoques de calibración: calibración manual -o calibración mediante prueba y error-

y calibración automática mediante algoritmos de modelación inversa. El campo de la calibración automática aún no se encuentra totalmente desarrollado y la calibración manual sigue siendo la más utilizada, por lo que es este último enfoque el que será abordado a continuación.

La Figura 9 muestra un esquema de la calibración de un modelo de flujo mediante prueba y error.

²⁵ Rangos comunes de referencia según tipo de roca o relleno se encuentran en el Anexo A1.

²⁶ Esto corresponde al caso típico en que el modelo de flujo y el de transporte son ejecutados de forma independiente. En el caso en que se utilice un código acoplado de flujo y transporte (por ejemplo Seawat) el proceso debería ser simultáneo.

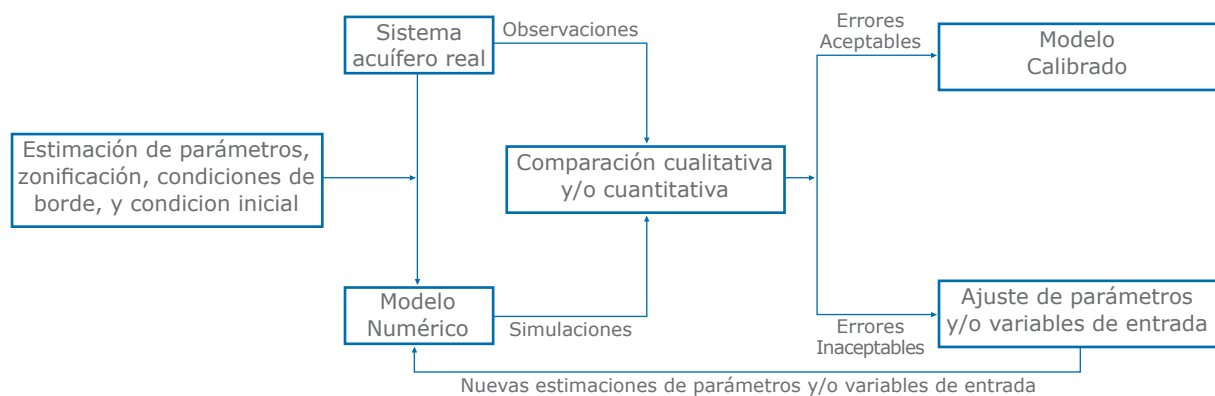


Figura 9: Calibración de un modelo de flujo por prueba y error.

Para inicializar el modelo, a cada parámetro seleccionado para la calibración se le asigna un rango de variación y un valor inicial (etapa anterior). Algunos parámetros se encuentran distribuidos espacialmente -como la conductividad hidráulica y el coeficiente de almacenamiento-, por lo cual se requiere asignar también la zonificación respectiva.

Una vez inicializado el modelo, se recomienda efectuar una primera corrida de verificación a fin de asegurar que las denominadas condiciones de borde impuestas (recarga superficial y lateral y extracciones subterráneas) se encuentren correctamente ingresadas. Para esto es posible valerse de la comparación entre las entradas o salidas impuestas y los

flujos que efectivamente lee el modelo en las series impuestas²⁷.

Con la información de entrada definida y habiendo verificado la consistencia en las condiciones de borde impuestas, se ejecuta el modelo y luego los resultados se comparan cualitativa y/o cuantitativamente con los valores observados, para posteriormente volver a correr el modelo variando uno, algunos o todos los parámetros.

El proceso anterior se repite invariablemente hasta lograr una buena correspondencia entre los valores simulados y observados, lo que se traduce en errores que cumplen con los criterios de aceptación previamente definidos (este tema se trata con detalle a continuación).

Metodología para modelos de transporte

Como bien se mencionó, la resolución del problema de transporte depende del campo de velocidades derivado del modelo de flujo, razón por la cual la calibración requiere de un proceso iterativo de variaciones de parámetros entre el modelo de flujo y el modelo de transporte. En este último modelo es importante considerar los procesos de transporte que se quieren incluir (dispersión, retardo, reacciones químicas, otros), la definición de las fuentes, escalas (eventualmente logarítmicas), representatividad de las observaciones y entradas adicionales al modelo (Hill y Tiedeman, 2007).

Una estrategia usual consiste en separar los procesos que se están modelando, incorporándolos progresivamente con el fin de lograr un mejor

entendimiento sobre cómo afecta cada uno de ellos al modelo y evaluar los parámetros a calibrar asociados a dichos procesos. De acuerdo a lo anterior, se recomienda:

- 1) Correr el modelo de flujo, lo cual permite estimar tiempos de viaje y direcciones del contaminante.
- 2) Correr el modelo con flujo incluyendo dispersión, con el objetivo de estimar tiempos y concentraciones del arribo del frente, *peak*, y cola de la pluma.
- 3) Correr el modelo incluyendo lo anterior junto con reacciones y/u otros mecanismos, de tal forma de tomar en cuenta cómo estos pueden afectar los tiempos, duraciones y concentraciones asociadas al transporte.

²⁷ Más detalles sobre la forma de verificar la consistencia en el ingreso de las condiciones de borde se encuentra en el apartado 4.2.3 Flujos en las condiciones de borde.

La Figura 10 resume un esquema de calibración para modelos de transporte, el que sigue el mismo esquema general de calibración para

modelos de flujo, pero incluyendo la necesidad de acoplar la calibración de ambos modelos y la estrategia recién expuesta.

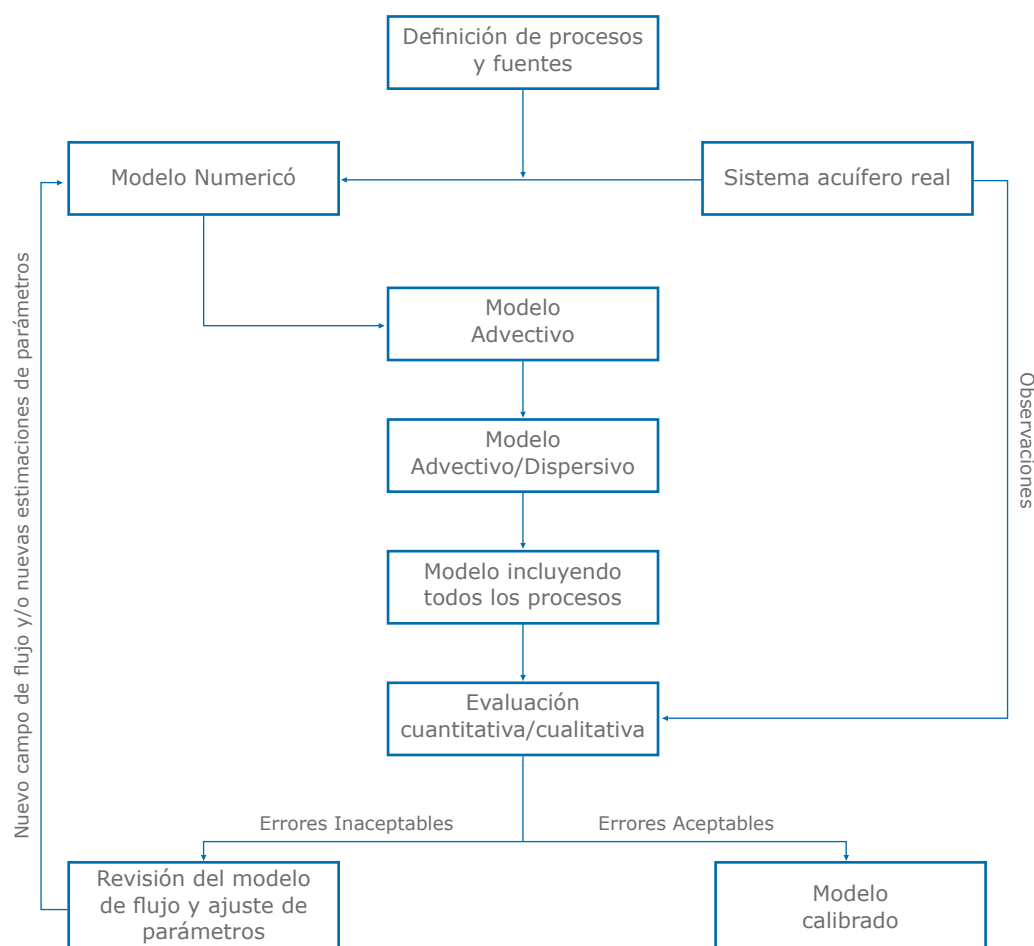


Figura 10: Calibración de un modelo de transporte por prueba y error.

Aspectos de la calibración en régimen permanente y régimen transiente

La calibración puede ser realizada en régimen permanente o en régimen transiente, lo que genera ciertas diferencias que merecen ser destacadas.

El régimen permanente es, en principio, más simple de calibrar, ya que basta reproducir un conjunto fijo y único de variables de estado objetivo, usualmente determinado a través de sus valores medios en el largo plazo²⁸.

El régimen transiente, por su parte, requiere de mayor información respecto a las variables de estado

que se utilizan en la comparación. En particular, es necesario que las series de tiempo sean consistentes con los períodos e intervalos de simulación. Es altamente recomendable realizar la calibración en intervalos de tiempo que abarquen distintas condiciones hidrológicas, por ejemplo, períodos húmedos y secos, o bien sometidos a variaciones producto de alteraciones inducidas (bombeos, regulación de ríos, etc.), ya que permite reducir el grado de *no unicidad* y evaluar la respuesta del modelo frente a la variabilidad hidrológica. Otro aspecto relevante es el disponer de la condición inicial requerida²⁹.

²⁸ Los valores medios en el largo plazo pueden ser estimados mediante el análisis de una situación de equilibrio en una época anterior, en la cual la extracción de aguas subterráneas era reducida.

²⁹ Ver apartado 3.3.7 Condiciones iniciales.

Criterios de aceptación

La evaluación del éxito de la calibración se debe realizar de forma cuantitativa y cualitativa. Ambas evaluaciones son necesarias, puesto que independientemente de la magnitud del error, es importante que el modelo refleje las tendencias observadas.

La evaluación cuantitativa se realiza mediante la evaluación de ciertos estadísticos, como por ejemplo, el error medio absoluto (MAE, por sus siglas en inglés) y/o la raíz del error cuadrático medio (RMSE, por sus siglas en inglés)³⁰. A modo referencial, un MAE igual a 5% de la diferencia máxima de niveles piezométricos observada en la zona puede ser considerada como una cota máxima del error aceptable (por ejemplo, si en el área de estudio la diferencia máxima en las cotas de la napa subterránea es de 200 m, el MAE debiera ser como máximo de 10 m). De forma complementaria, un MAE de uno o dos órdenes de magnitud menor a la precisión requerida para los resultados puede ser considerada como el error deseable (por ejemplo, errores del orden de centímetros corresponderían a una bondad de ajuste adecuada para representar diferencias de nivel de la napa del orden de metros). En cualquier caso, se recomienda presentar y evaluar los resultados obtenidos para ambos estadísticos (MAE y RMSE).

Por su parte, la evaluación cualitativa se realiza comparando y verificando la consistencia de mapas de contorno y perfiles -que representan la dirección de los flujos, descensos, concentraciones- entre el modelo conceptual y los resultados del modelo numérico.

Es importante destacar que el objetivo principal de la calibración es buscar la consistencia entre los resultados del modelo numérico

3.4.3 Validación

La validación se realiza mediante la misma metodología y criterios que la calibración, salvo que se utiliza un conjunto de observaciones independiente respecto de aquel utilizado para la calibración. Si se tienen registros de observaciones suficientes, se debería privilegiar un conjunto de datos que represente una condición hidrológica distinta a la de los datos utilizados en la calibración.

Para evaluar y aceptar la validación puede ser necesario realizar pequeños cambios en los parámetros del modelo numérico, lo cual es acep-

y el modelo conceptual. Es por esto que se debería privilegiar una mejor representación cualitativa de las tendencias del modelo conceptual por sobre la estricta minimización del error numérico, ya que esto último por sí solo no garantiza resultados coherentes con el comportamiento observado del sistema.

Otro aspecto fundamental es el error de cierre del balance hídrico en el modelo numérico (diferencia porcentual entre las entradas y salidas del modelo), el cual da cuenta del funcionamiento del motor numérico que sustenta al modelo. En cualquier caso dicho error debe ser inferior al 1% al final de cada período de stress, de lo contrario se considera que existen problemas numéricos inaceptables en el modelo.

Lo anterior no debe confundirse con las eventuales diferencias que podrían existir entre los términos que componen el balance hídrico del modelo conceptual y sus términos equivalentes en el modelo numérico (en particular ciertas condiciones de borde). En este último caso no es recomendable establecer un criterio para dichas discrepancias, ya que están determinadas principalmente por la construcción del modelo numérico. Sin embargo, es importante que sean identificadas y presentadas claramente, de tal forma que puedan ser evaluadas caso a caso (ver ejemplo en Figura 20 y Figura 21).

Por último, es importante destacar que la calibración es un proceso necesario, pero no suficiente. En efecto, las posteriores etapas de validación y seguimiento son trascendentales para reducir el grado de *no unicidad* y mejorar la confianza en las predicciones.

table en la medida que el modelo siga estando calibrado. Si se requieren cambios mayores, la validación pasa a ser en efecto una segunda etapa de calibración, por lo cual debería escogerse un tercer conjunto de datos independiente para llevar a cabo la validación.

El modelo se considera validado una vez que las variables simuladas se ajustan de buena forma a las observadas. Dicho ajuste se debería evaluar de forma cuantitativa y cualitativa, siguiendo el mismo procedimiento que para la calibración. Si bien un modelo validado está en condiciones de utilizarse

³⁰ Los distintos estadísticos para el análisis cuantitativo se detallan en el Anexo A6.

para fines predictivos, es importante destacar que la validación absoluta no es teóricamente posible. Siempre existirá incertidumbre y muchas veces

dicha incertidumbre es imposible o muy difícil de cuantificar, por lo que los resultados de las simulaciones deben ser interpretados cuidadosamente.

3.4.4 Análisis de sensibilidad

En estricto rigor, un análisis de sensibilidad se refiere a la variación de los resultados del modelo producto del cambio en un sólo parámetro, lo que se conoce como *ceteris paribus*, mientras que el cambio en un grupo de parámetros se conoce como un análisis de escenario. Para fines prácticos, ambos términos se engloban indistintamente bajo el mismo concepto y se les denomina simplemente análisis de sensibilidad.

Los parámetros utilizados comúnmente para llevar a cabo el análisis de sensibilidad en un modelo hidrogeológico son las constantes elásticas, conductividades, coeficientes asociados a los mecanismos de transporte e incluso variables de entrada, como las tasas o caudales de recarga.

A modo general, la metodología para llevar a cabo un análisis de sensibilidad involucra identificar los parámetros a evaluar y asociarles un rango realista de variación posible, para luego correr el modelo repetidas veces variando cada

parámetro y analizando su efecto en los resultados de la modelación.

Resulta relevante aclarar que un análisis de sensibilidad puede llevarse a cabo en distintas etapas de la construcción de un modelo hidrogeológico, siendo útil para diversos fines. Es frecuente que sea utilizado como herramienta para definir cuáles son los parámetros con mayor incidencia en los resultados del modelo numérico, ayudando así a definir los parámetros más gravitantes para la calibración. **También, y una vez que el modelo ha sido calibrado (y validado), puede ser utilizado para evaluar el efecto que tendrían variaciones en los parámetros más inciertos del modelo, asociando estas variaciones a rangos de confianza en los resultados (predicciones). Esto último permite evaluar condiciones asociadas a distintos niveles de riesgo y cobra especial relevancia cuando se tiene registro de observaciones por menos de 5 años y no es recomendable realizar un proceso de validación³¹.**

3.4.5 Simulaciones

Sólo una vez que el modelo se encuentra calibrado y validado (en caso de ser posible), se considera que éste tiene una capacidad predictiva adecuada y cobra sentido llevar a cabo las simulaciones. Ciertamente las simulaciones deben ser consistentes con el proceso de ajuste realizado, por ejemplo la capacidad predictiva de una simulación en régimen transiente debe responder a una calibración satisfactoria realizada bajo condiciones transientes.

Resulta fundamental caracterizar el contexto de las diversas simulaciones realizadas, indicando expresamente el horizonte de tiempo considera-

do, el que depende de los objetivos de la modelación y de los fenómenos que se desea representar³², y su nivel de discretización temporal, con especial énfasis en los supuestos y consideraciones asociados a la recarga y extracciones (y otras condiciones de borde impuestas).

Para cada escenario se debería describir también la condición inicial considerada, lo cual cobra relevancia para simulaciones en régimen transiente.

Los resultados más relevantes de una simulación y una recomendación de cómo presentarlos se detalla en el siguiente capítulo.

3.4.6 Precisión de los resultados

Como se ha explicado anteriormente, una modelación consiste en una simplificación de la realidad, y como tal reposa en una serie de supuestos que permiten una conceptualización más sencilla de fenómenos complejos. Siendo así, existe una incertidumbre que subyace en el proceso mismo

de modelación, a la cual debe sumarse además la incertidumbre del comportamiento futuro de la hidrología en el caso de modelos predictivos. En dichos modelos también son frecuentes aquellos casos en que el periodo de simulación es mucho más largo que el periodo considerado para cali-

³¹ Ver apartado 3.4.1 Asignación de datos para calibración y validación.

³² Recomendaciones al respecto fueron presentadas en el apartado 3.3.5 Intervalo de tiempo y horizonte de simulación.

brar y/o validar, por lo cual errores relativamente pequeños en la calibración pueden verse altamente magnificados durante las simulaciones, aumentando así la incertidumbre.

En definitiva, aunque el ajuste en la calibración y/o validación haya sido exitoso, los resultados de las simulaciones deben ser interpretados cuidadosamente y tratados siempre como estimaciones o tendencias de los cambios esperables.

3.4.7 Listado de información requerida

La Tabla 12 resume los principales requerimientos de información y cuidados para llevar a cabo un proceso de ajuste en los parámetros, orientado a representar de buena forma las condiciones observadas en el sistema acuífero y a mejorar la capacidad predictiva del modelo. Se identifica la información “mínima”

Por último, es importante destacar que para reducir la incertidumbre, y consecuentemente aumentar la precisión esperada de los resultados, los esfuerzos deben centrarse en mejorar la conceptualización del modelo. Cambios en el modelo numérico que no estén sustentados en mejoras del modelo conceptual muy difícilmente lograrán resultados más precisos.

que se debería acompañar para evaluar la capacidad predictiva de cualquier modelo (elementos básicos) y la información “deseable”, que corresponde a información complementaria que podría requerirse en ciertos casos, en especial para modelos de alta complejidad y nivel de detalle.

Tabla 12: Listado de información requerida para evaluar la capacidad predictiva del modelo

Tema	Ítem	Tipo de requerimiento		Descripción
		Mínimo	Deseable	
Calibración (también aplicables a la validación)	Parámetros	X		Incluir un listado de los parámetros (y condiciones de borde) a calibrar, los rangos de variabilidad considerados y una justificación de su elección
	Condición inicial	X		Descripción de la condición inicial utilizada (relevante sólo para calibración transiente)
	Verificación condiciones de borde impuestas	X		Comparación de las series de recargas y extracciones impuestas (derivadas del modelo conceptual) con las que efectivamente lee el modelo numérico (resultado de simulaciones), a fin de evaluar la importancia de pérdidas por secado de celdas y su efecto sobre el balance hídrico. Contraste puntual para régimen permanente o de las series impuestas v/s leídas para evaluaciones transientes (ejemplo en Figura 20 y Figura 21)
	Ajuste de niveles y concentraciones	X		Proveer los estadísticos que permiten cuantificar la bondad de ajuste del modelo, es decir que den cuenta de la diferencia entre los niveles y concentraciones medidos y simulados (ejemplo en Tabla 13), junto con gráficos (ejemplo en Figura 11) y figuras (planta con la distribución de errores) adecuadas (ejemplo en Figura 12 y Figura 13)
				Mostrar mediante los medios apropiados el nivel de ajuste entre variables observadas y obtenidas con el modelo para los distintos puntos de control (tablas, gráficos y figuras o planos). En régimen permanente, incluir tabla o figura con los valores observados v/s calculados. Para régimen transiente, presentar los gráficos de ajuste de niveles a una escala vertical apropiada para una comparación efectiva. Sólo agrupar pozos de observación con variaciones de niveles afines (ejemplo en Figura 16)

Tema	Ítem	Tipo de requerimiento		Descripción
		Mínimo	Deseable	
Calibración (también aplicables a la validación)	Piezometría y concentraciones obtenidas	X		Comparación de las curvas de igual altura piezométrica (y el gradiente y sentido de escurrimiento correspondiente) y concentración que entrega el modelo con las derivadas previamente en el modelo conceptual (ejemplo en Figura 14 y Figura 15)
	Balance hídrico	X		El objetivo es conocer los flujos de entrada y salida producto de diversos mecanismos en el área de modelación y eventualmente en un sector en particular. Presentar los distintos flujos y un balance total según lo indicado en los apartados 4.2 Flujos y 4.3 Balances de masa - Considerar que el error máximo aceptable es de un 1% medido al final de cada período de <i>stress</i> - Presentar una comparación de estos resultados con el balance hídrico del modelo conceptual
Análisis de sensibilidad	Estimar incertidumbre		X	Presentar listado de parámetros y sus rangos de variación analizados. Indicar los cambios asociados a cada análisis de sensibilidad efectuado y presentar figuras donde se aprecie la variación respecto a resultados del modelo nominal
Simulaciones	Definición de escenarios	X		Describir el marco de las distintas simulaciones, abordando al menos horizonte de tiempo adoptado y su nivel de discretización (mensual, anual, etc.), la caracterización de los ingresos al sistema (recarga) y de las explotaciones subterráneas y/o fuentes contaminantes incluidas. Mencionar todos los aspectos y supuestos relevantes considerados para definir los escenarios de simulación
	Condición inicial	X		Descripción de la condición inicial utilizada (relevante para régimen transiente)
	Verificación condiciones de borde impuestas	X		Comparación de las series de recargas y extracciones impuestas (derivadas del modelo conceptual) con las que efectivamente lee el modelo numérico (resultado de simulaciones), a fin de evaluar importancia de pérdidas por secado de celdas y su efecto sobre el balance hídrico. Contraste puntual para régimen permanente o de las series impuestas v/s leídas para evaluaciones transientes (ejemplo en Figura 20 y Figura 21)
	Balance hídrico	X		El objetivo es conocer los flujos de entrada y salida producto de diversos mecanismos en el área de modelación y eventualmente en un sector en particular. Presentar los distintos flujos y un balance total según lo indicado en los apartados 4.2 Flujos y 4.3 Balances de masa - Considerar que el error máximo aceptable es de un 1% medido al final de cada período de <i>stress</i> - Presentar una comparación de estos resultados con el balance hídrico del modelo conceptual
	Resultados	X		Resultados como variación temporal de la altura de la napa en los puntos de control, distribución espacial de los descensos respecto a una situación inicial, extensión de la pluma de contaminación, flujos y balance hídrico, deben ser resumidos de manera clara y con los medios de apoyo necesarios (tablas, gráficos y figuras o planos), algunos de los cuales se presentan con mayor detalle en el Capítulo 5

FRECUENCIA RELATIVA (%)

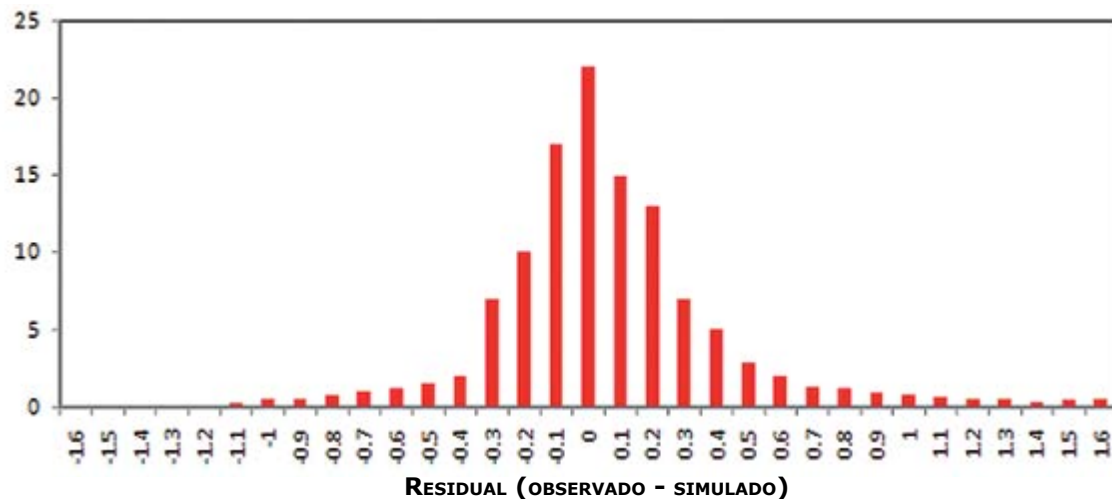


Figura 11: Ejemplo de un análisis cuantitativo de la calibración. Es deseable que el histograma resultante sea simétrico (errores bien distribuidos) y que esté centrado en torno a cero.

Tabla 13: Detalle de promedios residuales y error cuadrático medio de la calibración para un modelo de flujo

Parámetro	Calibración Oct-97 a Jun-03
Número de pozos	96
Número de residuales	4381
Promedio de errores residuales (metros)	0,02
Error medio absoluto (MAE) (metros)	0,18
Raíz del error cuadrático medio (RMSE) (metros)	0,44

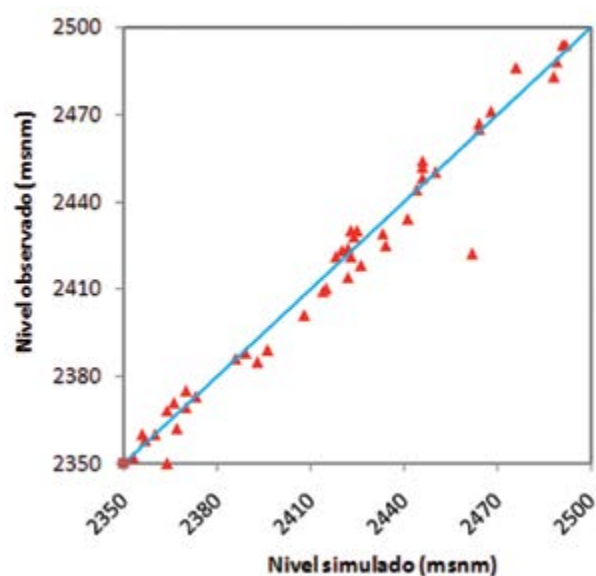


Figura 12: Ejemplo de resultados de calibración o validación en régimen permanente.

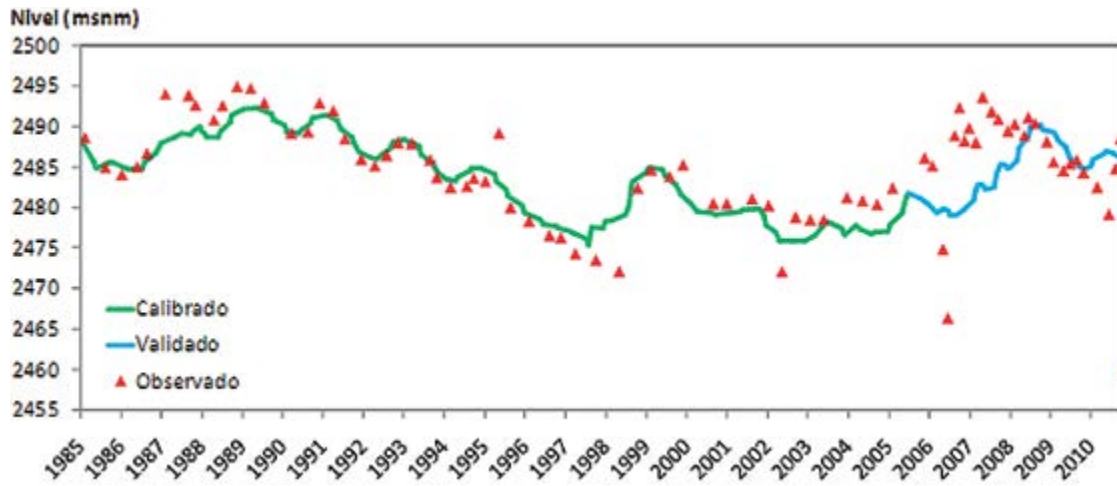


Figura 13: Ejemplo de resultados de calibración y validación en régimen transiente. Se pueden apreciar claramente los períodos que corresponden a la calibración y la validación, y el conjunto de observaciones asociado a cada uno.

4

PRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES

Dada la cantidad de disciplinas, etapas, procesos, variables y parámetros involucrados en un estudio hidrogeológico, la presentación de los resultados de la modelación (simulaciones) es de suma importancia para permitir un entendimiento simple y acabado. Dichos resultados corresponden a las variables dependientes (niveles piezométricos y concentraciones), flujos y balances hídricos o balances de masa.

En general, estos resultados deberían ser presentados mediante mapas, gráficos y tablas, evitando saturar estas figuras con información poco relevante que dificulte la interpretación, y utilizando etiquetas y tamaño de fuentes apropiadas para una correcta visualización³³.

4.1 VARIABLES DEPENDIENTES

Las variables dependientes en un modelo hidrogeológico corresponden a los niveles piezométricos, descensos -producto de la comparación de niveles antes y después de un evento- y concentraciones. Estas deben ser

representadas a partir de mapas y gráficos acotados de acuerdo a una escala adecuada, donde se muestren en forma clara e íntegra los resultados, sin generar ambigüedades en su interpretación.

4.1.1 Régimen permanente

Para simulaciones en régimen permanente se sugiere presentar la piezometría en un mapa de contornos general para el área de modelación (ver Figura 14) e incluir un mayor nivel de detalle a través de mapas locales en zonas de interés. En general, basta con utilizar curvas de nivel cada 10 – 20 metros, las cuales deberían presentarse en números cerrados a la decena. En el caso en que se presenten

variaciones menores en los niveles piezométricos, se recomiendan curvas de nivel cada 1 metro, aunque en el caso de sistemas altamente sensibles, por ejemplo salares, podría resultar adecuada una escala menor a 1 metro. Escalas muy pequeñas, por ejemplo del orden de 1 centímetro, no tienen interés práctico, ya que se encuentran dentro del rango de error de las mediciones.

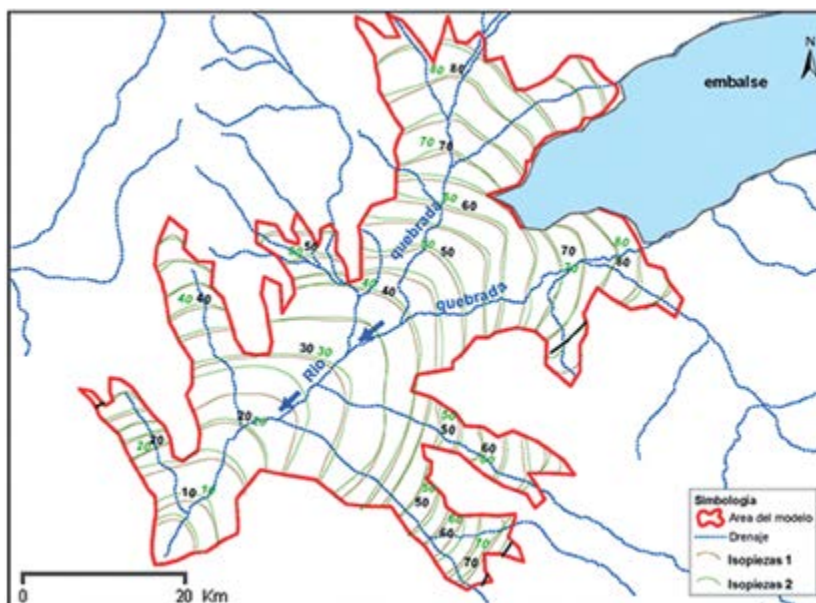


Figura 14: Presentación de un mapa de contornos de niveles piezométricos o isopiezas simulados (1) y observados (2).

³³ Se recomienda al menos una fuente número 10.

Para concentraciones, los rangos entre los cuales éstas varían son generalmente amplios y puede resultar adecuado presentar un mapa de contornos con una discretización más gruesa para las curvas de nivel (ver Figura 15), incluso se podrían utilizar escalas logarítmicas.

Se debe aclarar que lo anterior sólo busca tener una idea general del comportamiento en el sistema acuífero y, en rigor, cada mapa y el espaciamiento de las curvas de nivel asociado debe ser evaluado independientemente.

Con el fin de presentar un mayor nivel de detalle en zonas de interés (zonas sensibles ambientalmente, o con mayores gradientes hidráulicos y/o de concentraciones), se recomienda encarecidamente presentar mapas locales a una escala más fina. Para esto, se debiera tener en consideración que si varios mapas locales son presentados en conjunto, todos deberían obedecer a la misma escala, para así facilitar la interpretación y comparación entre ellos.

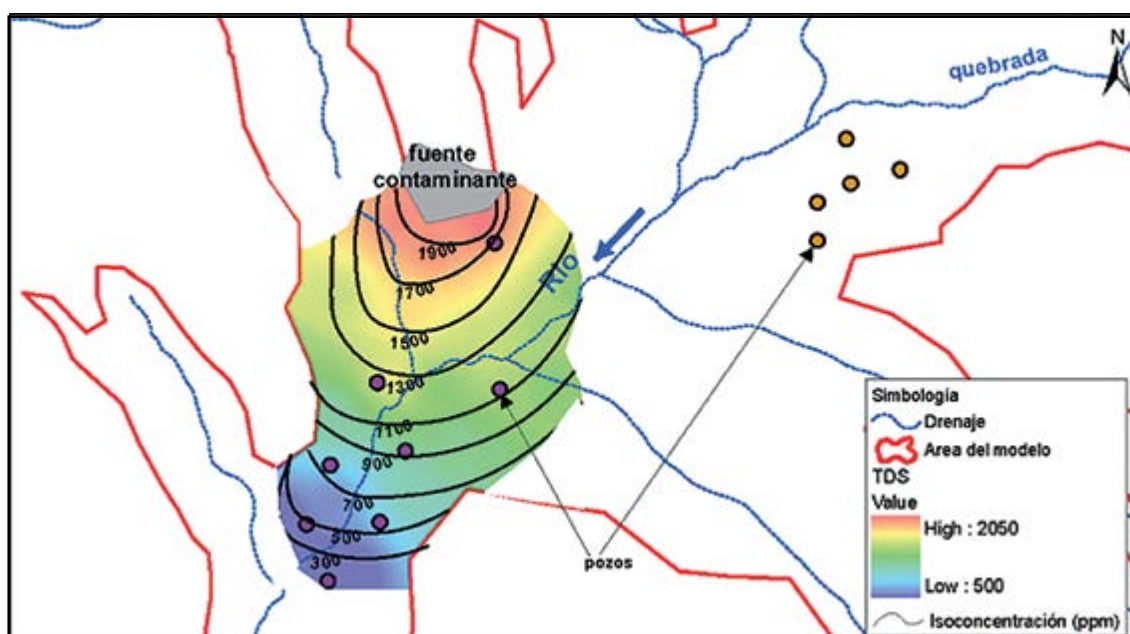


Figura 15: Comparación cualitativa de la concentración simulada (mapa de colores) y observada (líneas de contorno).

4.1.2 Régimen transiente

Para simulaciones en régimen transiente se requiere caracterizar el comportamiento espacial y temporal del sistema. Para caracterizar el comportamiento espacial se sugiere presentar mapas de contornos como el de la Figura 14 para ciertos instantes de interés, como por ejemplo, para el final del tiempo de modelación, mientras que para caracterizar el comportamiento temporal se recomienda presentar series de niveles o concentraciones en función del tiempo en diferentes puntos.

Los mapas de contorno para representar la piezometría y sus eventuales variaciones (descensos) obedecen a las mismas recomendaciones que fueron señaladas para el régimen permanente.

Cuando se muestran gráficos de series de niveles asociados a puntos distintos, se recomienda presentarlos bajo la misma escala, aunque si el comportamiento y las variaciones entre ellos son muy disímiles, deberían ser presentados agrupados mediante una sectorización con escalas independientes, que permita visualizar las tendencias y variaciones de cada zona (ver Figura 16). Si los gráficos corresponden a variaciones respecto al nivel estático de la napa, la escala debería incorporar desde el 0 hasta el valor de máximo descenso, incluyendo un eje de ordenadas invertido (ver Figura 16).

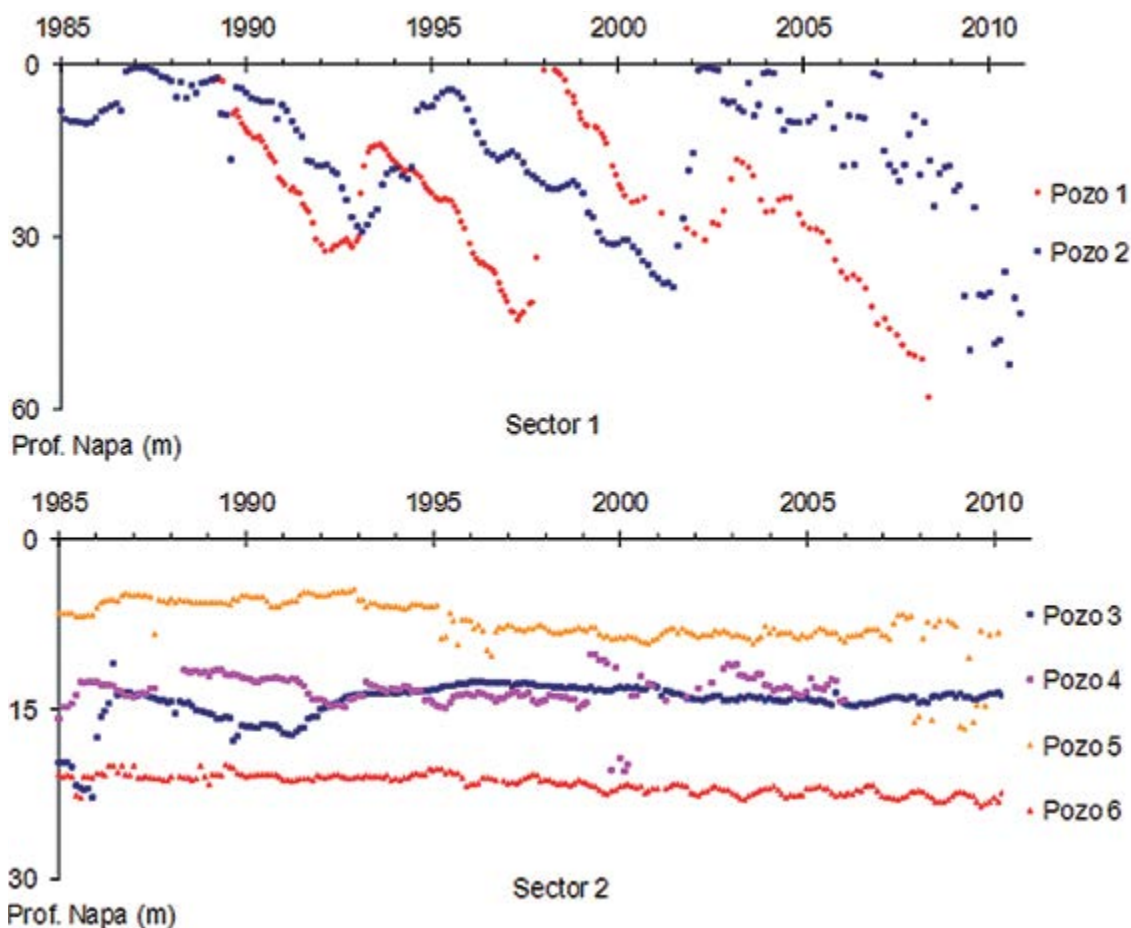


Figura 16: Presentación de pozos por sectores que muestran un similar comportamiento hidráulico.

Este tipo de gráfico siempre debe ser presentado, independiente que se incluyan mapas de contornos que muestren el comportamiento general del acuífero. Esto resulta importante

en la evaluación de impacto ambiental, ya que es común que sistemas ambientales presenten sensibilidad a descensos en el nivel de la napa inferiores a 1 metro.

4.2 FLUJOS

Es indispensable que todos los flujos de salida y entrada del modelo sean detallados, particularmente aquellos asociados

a las condiciones de borde, ya sean impuestos por el usuario o calculados por el modelo.

4.2.1 Régimen permanente

En régimen permanente se recomienda incluir una figura esquemática en planta (ver Figura 17) que indique la localización y dirección de los

flujos, junto con un gráfico de columnas (ver Figura 18) y/o una tabla (ver Tabla 14) donde se aprecie la magnitud de estos flujos.

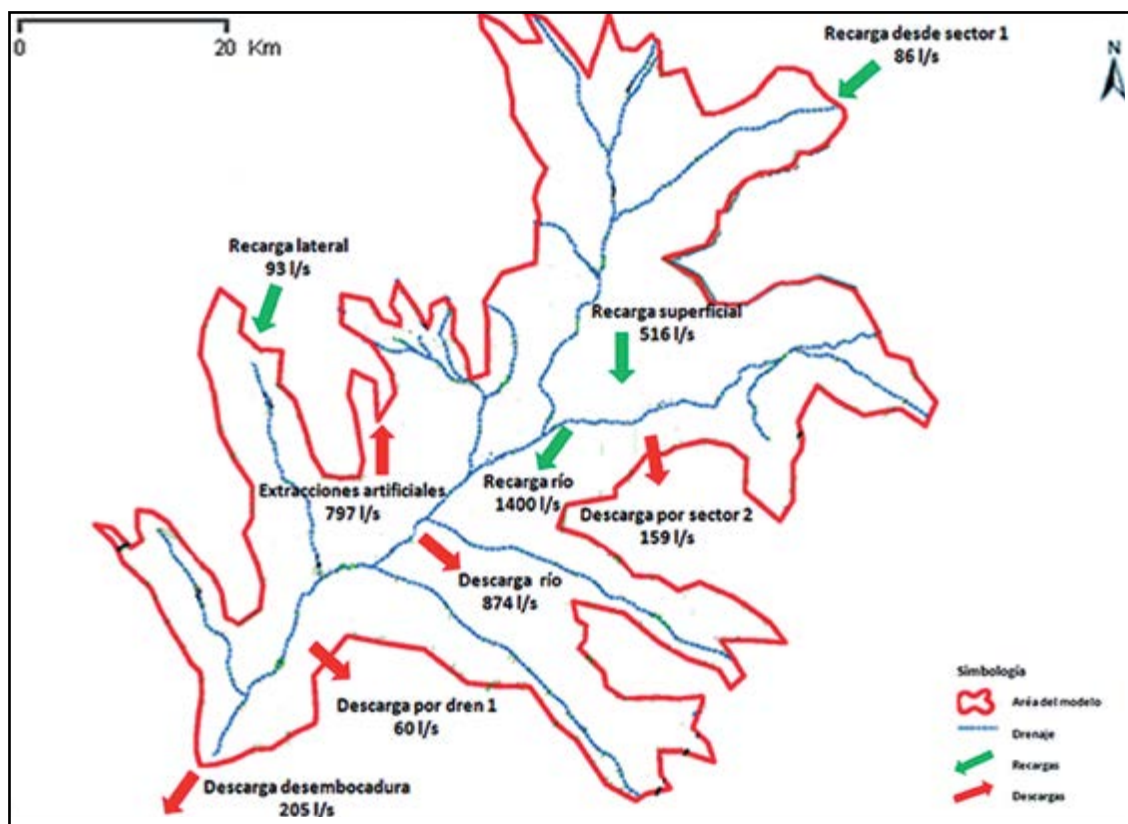


Figura 17: Representación esquemática de los flujos para régimen permanente (flechas verdes: entradas al modelo, flechas rojas: salidas del modelo).

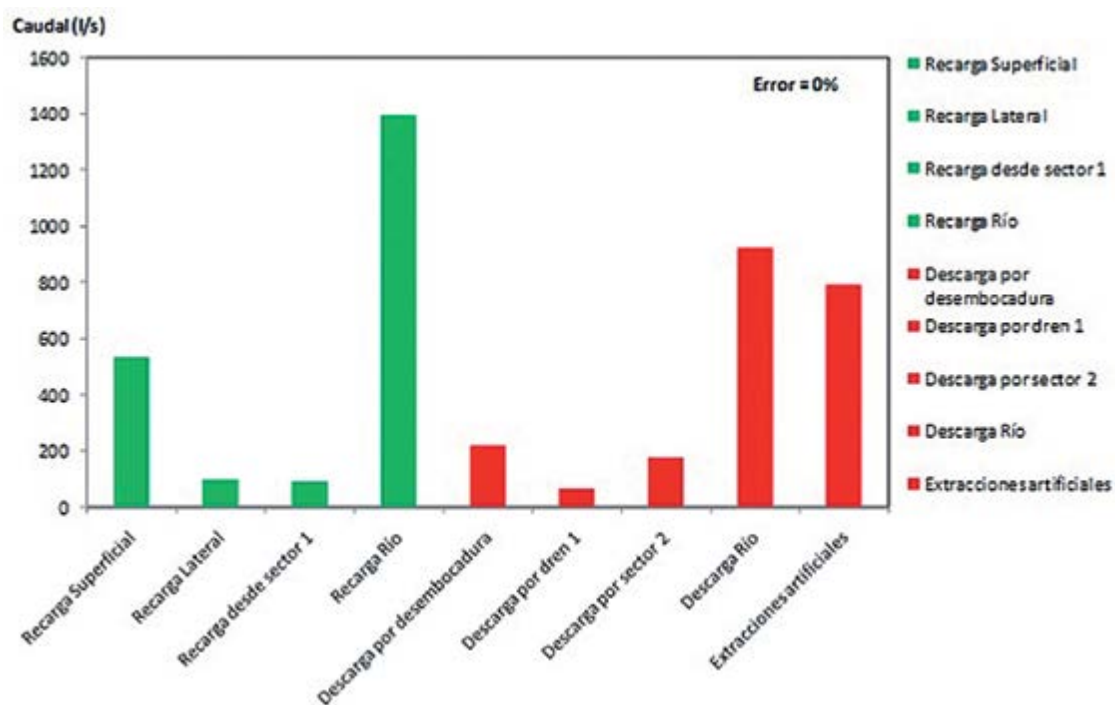


Figura 18: Presentación de flujos para régimen permanente (en verde: entradas al modelo, en rojo: salidas del modelo).

Tabla 14: Detalle de flujos en régimen permanente

Entrada / Salida	Caudal (l/s)
Recarga superficial	516
Recarga lateral	93
Recarga desde sector 1	86
Recarga Río	1.400
Total entradas	2.095
Descarga por desembocadura	205
Descarga por dren 1	60
Descarga por sector 2	159
Descarga Río	874
Extracciones artificiales	797
Total salidas	2.095

4.2.2 Régimen transiente

En régimen transiente se recomienda incluir gráficos de series con los flujos correspondientes a todo el período de simulación (ver Figura 19), acompañados de una tabla que incluya los valores medios o de largo plazo (ver Tabla 15).

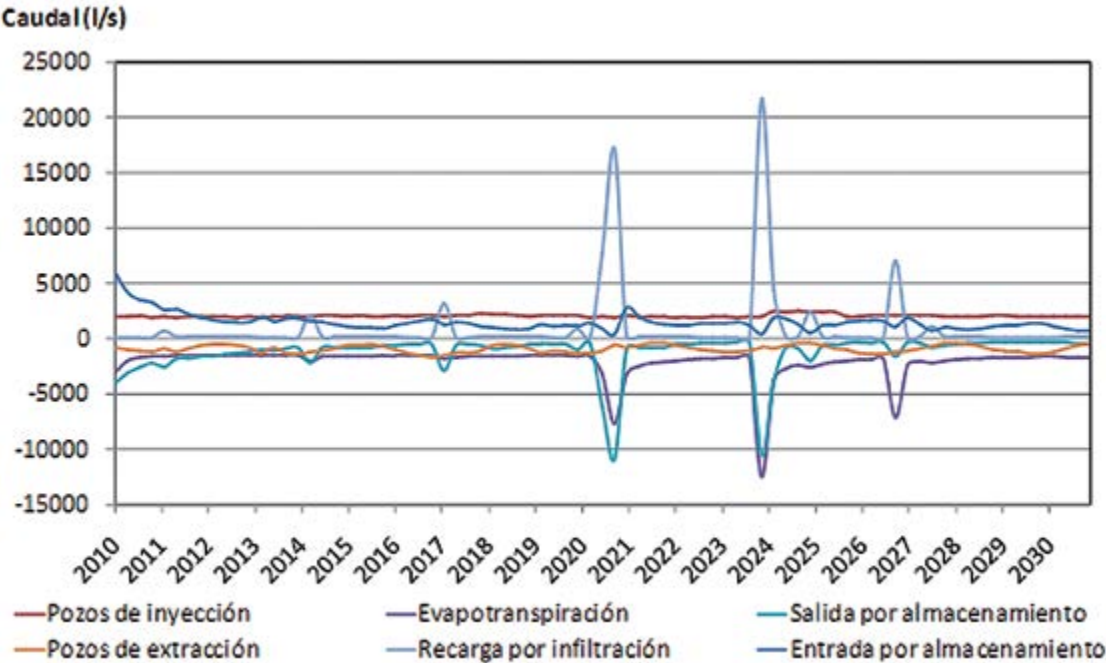


Figura 19: Presentación de flujos individuales para el régimen transiente, valores positivos/negativos corresponde a entradas/salidas del sistema.

Tabla 15: Valores medios de los flujos para el régimen transiente

Flujo		Valor medio período 2010 - 2030 (l/s)
Entradas	Recarga por infiltración	1.675
	Pozos de inyección	2.260
	Entrada por almacenamiento	1.995
Salidas	Evapotranspiración	2.455
	Pozos de extracción	1.478
	Salida por almacenamiento	1.992
Total entradas		5.930
Total salidas		5.925
Error (%)		0,08

4.2.3 Flujos en las condiciones de borde

Resulta de particular interés como medio de verificación presentar gráficos que permitan evaluar la consistencia entre la recarga o extracciones ingresadas al modelo numérico y las que efectivamente son computadas por éste,

debido a diferencias que se podrían provocar por el secado de celdas y/u otros aspectos particulares dentro de la modelación numérica. Un ejemplo de lo anterior se presenta en la Figura 20 y Figura 21.

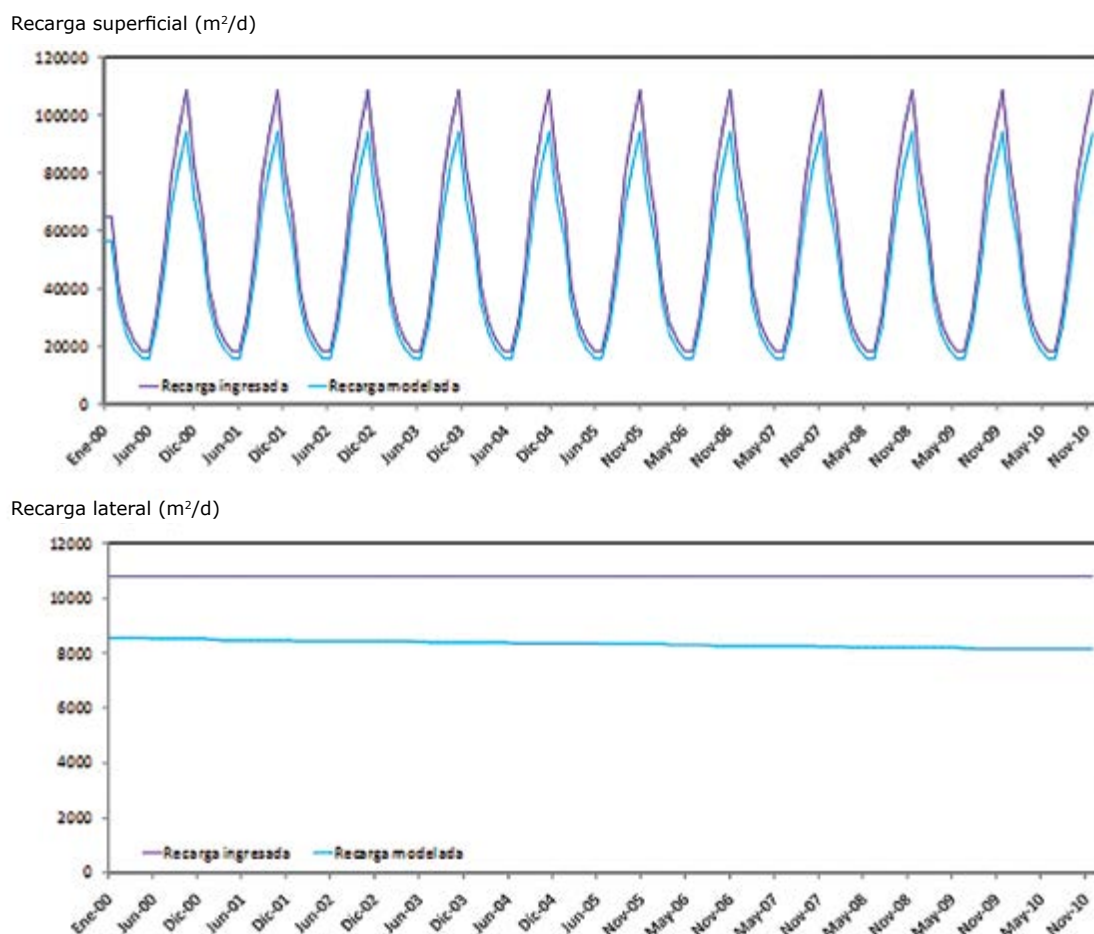


Figura 20: Comparación de valores de recarga impuestos y la realmente leída por el modelo numérico. La importancia de cada pérdida debe evaluarse a la luz del total de recarga del sistema.

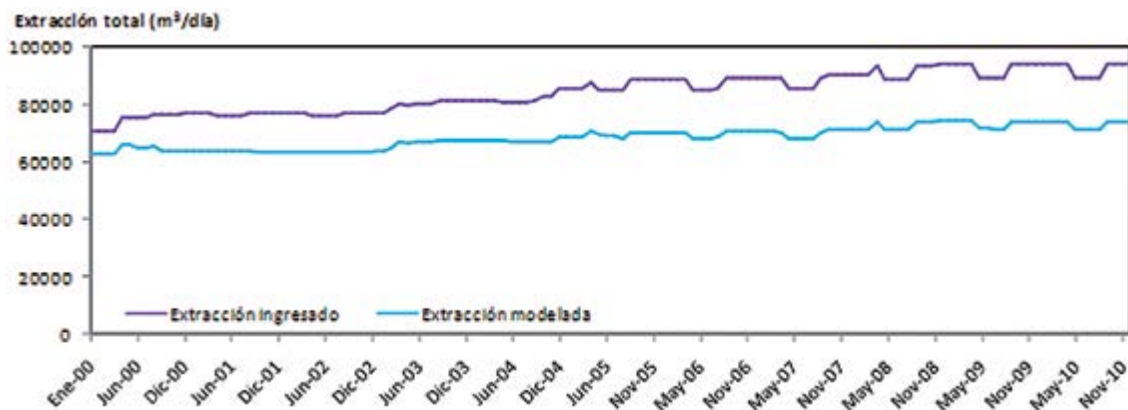


Figura 21: Comparación de valores de extracción impuestos y la realmente leída por el modelo numérico. En este caso la implicancia de las diferencias debe evaluarse en detalle.

Para condiciones de borde distribuidas espacialmente, se deben señalar los flujos por zonas, en particular, detallando tramos en que se tiene distinto comportamiento hidráulico (recargas o descargas al acuífero), como

ríos, arroyos, lagos, entre otros. Un ejemplo de lo anterior se señala en la Tabla 16, pudiendo corresponder a valores instantáneos (régimen permanente) o a valores promedio (régimen transiente).

Tabla 16: Detalle de flujos para la condición de borde de río

Tramo de río	Infiltración (l/s)	Recuperación (l/s)	Neto	Funcionamiento
A	437,0	436,9	0,1	Río a Acuífero
B	152,0	342,9	-190,9	Acuífero a Río
C	172,1	97,3	74,7	Río a Acuífero
D	4,5	126,1	-121,5	Acuífero a Río
E	141,2	52,4	88,8	Río a Acuífero
F	31,8	17,2	14,7	Río a Acuífero
Total	938,7	1072,8	-134,1	

4.3 BALANCES DE MASA

Siempre se debería presentar el balance de masa para toda el área de modelación y, eventualmente incluir balances locales para zonas que puedan ser de interés ya sea de acuerdo a las características del sistema (por ejemplo: condiciones de borde con flujos no nulos, extracciones, recargas) o a la geomorfología del área de modelación (por ejemplo: angosturas, bifurcaciones, zonas de mezcla). **Para el balance se debe explicitar el error de cierre, el cual debe ser inferior al 1% al final de la simulación para régimen permanente,**

o al final de cada período de stress para régimen transiente.

El balance para el modelo de flujo debe ser presentado en términos de los caudales totales, mientras que el balance para el modelo de transporte debe ser presentado respecto a la masa total de las sustancias analizadas.

En régimen permanente resulta adecuado presentar el balance total mediante gráficos de columnas, explicitando claramente el error de cierre (ver Figura 22).

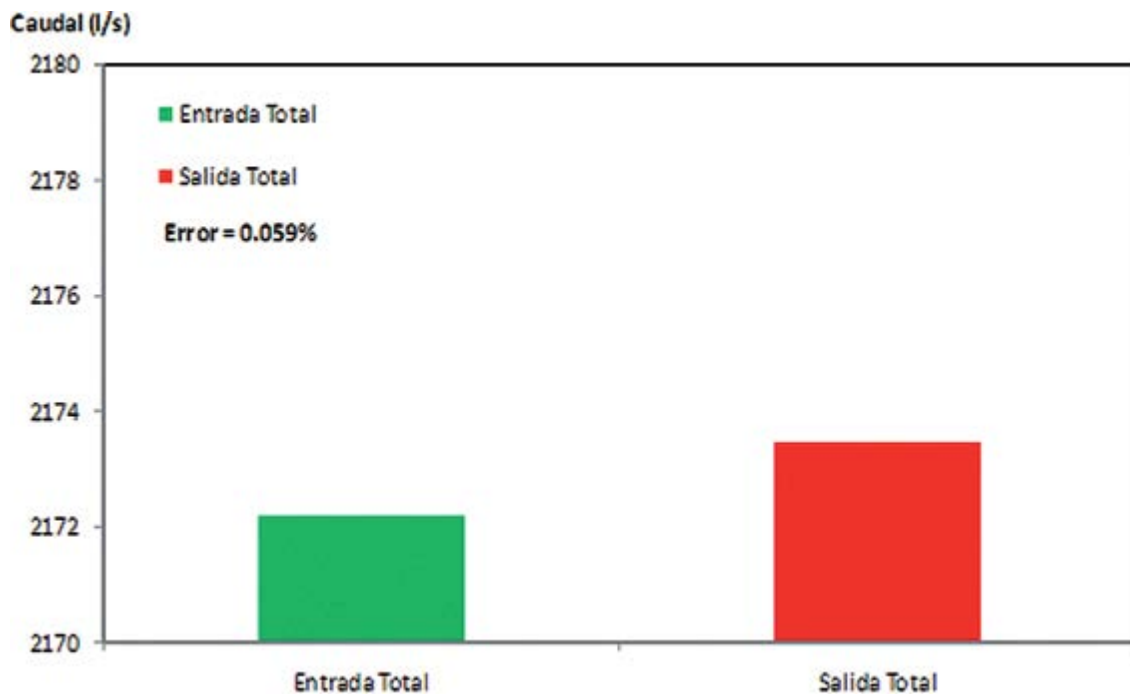


Figura 22: Presentación del balance total y error de cierre para simulaciones en régimen permanente.

Para régimen transiente resulta adecuado presentar gráficos de los flujos totales de entrada

y de salida, así como también el error de cierre en función del tiempo (ver Figura 23).

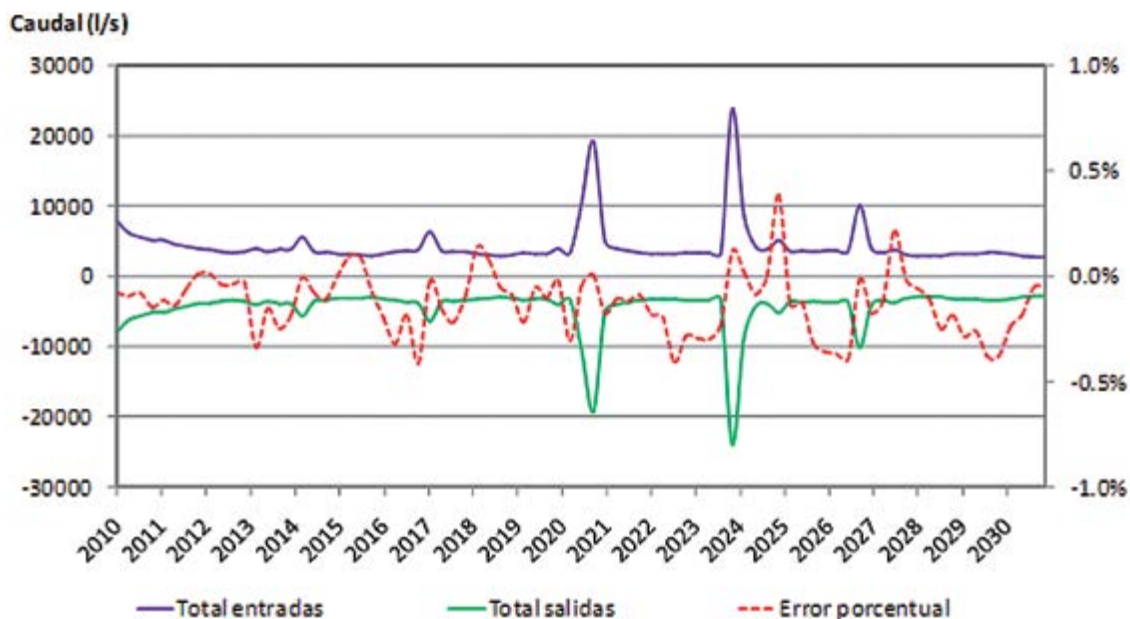


Figura 23: Presentación del balance total y error de cierre para simulaciones en régimen transiente.

Si bien los balances podrían ser representados en términos de volúmenes totales, se recomienda presentarlos de acuerdo a tasas (caudales o

flujos máscicos), con el objetivo de facilitar la interpretación y mejorar la significancia física de los resultados.

5

CONTENIDOS MÍNIMOS DEL INFORME TÉCNICO DE MODELACIÓN

En el Capítulo 4 se incluyen listados con la información mínima que debería ser presentada para llevar a cabo la evaluación de un modelo hidrogeológico, distinguiendo según el modelo conceptual (Tabla 4), modelo numérico (Tabla 11) y el ajuste del modelo a las observaciones (Tabla 12). Lo anterior se asocia, en muchos casos, a un volumen importante de información que puede requerir de varios documentos y anexos para su presentación.

A modo de establecer un orden general, se sugiere presentar un Informe Técnico de Modelación resumido que siga el mismo orden que la presente Guía y contenga en su cuerpo los aspectos más relevantes, acompañado de los anexos que sean necesarios de tal forma que la información presentada, en su conjunto, abarque al menos lo contenido en los listados referidos.

Dicho informe técnico deberá incluir también una sección destinada a describir cómo fueron considerados diversos aspectos relevantes para la modelación, principalmente supuestos, simplificaciones y enfoques adoptados. Algunos de los aspectos que deberían ser incluidos son:

- Fundamento sobre la selección del *software* y los procesos incluidos en la modelación, en relación a la correcta representación de los elementos y procesos relevantes del sistema hidrogeológico.

- En caso de modelos que incluyan acuíferos fracturados, kársticos o con alguna singularidad en particular, se debe detallar la forma en que fue abordada la modelación y discutir acerca de su representatividad y la confiabilidad de los resultados.
- Discusión sobre la idoneidad de la discretización temporal adoptada y el horizonte de simulación considerado para cumplir con los objetivos requeridos (necesidad de representar estacionalidad, corto plazo o largo plazo, precisión, otros).
- Discusión sobre la forma de representar la anisotropía del acuífero a través de la selección de parámetros hidráulicos y asignación de su distribución, en especial la conductividad hidráulica, además de otras aproximaciones atendiendo a las características geológicas del dominio de modelación. Lo anterior es relevante ya que puede tener gran incidencia en los resultados de la modelación numérica.
- Discusión sobre la validez de las metodologías seleccionadas para estimar las distintas entradas y salidas del sistema, en particular la recarga por precipitación.
- Discusión sobre la calidad del ajuste logrado (calibración, validación y/o análisis de sensibilidad).
- Alcance y precisión del modelo en relación a la cantidad, tipo y calidad de los datos que sustentan la modelación (conceptual y numérica).

6

USO DEL MODELO PARA EL DISEÑO DEL PLAN DE SEGUIMIENTO DE LAS VARIABLES AMBIENTALES

Si durante el proceso de evaluación se implementa un modelo hidrogeológico, resulta de gran valor el uso de esta herramienta no solo para evaluar los potenciales impactos ambientales, sino que también para otros fines como el diseño de planes de seguimiento, medidas de mitigación y, de manera general, cualquier obra o acción que se relacione con el funcionamiento del sistema acuífero.

En el marco de la presente Guía, se considera que si se dispone de un modelo hidrogeológico resulta imprescindible su utilización como una herramienta para diseñar el Plan de Seguimiento de las Variables Ambientales (PSVA) y las obras y/o acciones que puedan estar asociadas a él.

6.1

PLAN DE SEGUIMIENTO DE LAS VARIABLES AMBIENTALES

Dada la pequeña magnitud con la que usualmente se mueven los flujos de aguas subterráneas, el éxito de las predicciones de un modelo a mediano y largo plazo no se puede evaluar a ciencia cierta en lo inmediato. Además, y teniendo presente que los sistemas hidrogeológicos son dinámicos, se reconoce que un modelo nunca estará completamente validado. Por todo ello, es importante diseñar un adecuado PSVA, cuyo objetivo fundamental es monitorear y asegurar que las variables ambientales fueron adecuadamente evaluadas y se comportan de la manera proyectada y, que por tanto, las medidas y condiciones establecidas resultan ser idóneas.

Para cumplir con lo anterior y disponer de un PSVA robusto, el modelo puede ser utilizado como una sólida base técnica para determinar qué, dónde y cuándo, es decir, para definir los parámetros objetivo, la localización de los puntos de monitoreo y la frecuencia de las mediciones.

Parámetros objetivo: las simulaciones permiten prever cuáles son los parámetros que podrían experimentar variaciones más significativas debido a las perturbaciones introducidas, ya sean estos los niveles piezométricos, las concentraciones o bien una combinación de ambas. En el caso en que se proyecten variaciones en la calidad del agua, resulta de particular relevancia establecer cuáles son los parámetros más representativos de los potenciales efectos que podrían ocurrir en el sistema, de manera de enfocar el monitoreo en ellos.

Localización de los puntos (pozos) de observación: el análisis de los escenarios simulados (con y sin

proyecto) permite definir el área de influencia del proyecto, es decir, el límite a partir del cual los efectos del proyecto son nulos o despreciables. Por lo tanto, a través de la modelación es posible restringir el área dentro de la cual se realizará el monitoreo ambiental y definir la localización precisa de los pozos de observación para el seguimiento. Idealmente, el seguimiento debería realizarse en base a las mismas observaciones utilizadas durante la calibración y validación, pero es altamente recomendable incorporar otras observaciones en sectores del modelo que podrían ser de interés, por ejemplo en aquellas zonas donde el modelo indica que existirán impactos importantes, en zonas donde se producirían los mayores gradientes (hidráulicos o de concentraciones), en zonas donde se experimentarían bruscos cambios transientes, en zonas de relevancia ambiental donde no se cuente con suficiente información o en zonas de control donde no se esperan impactos producto del proyecto³⁴.

Frecuencia de las observaciones: las simulaciones permiten estimar la velocidad de respuesta del sistema hidrogeológico ante las perturbaciones introducidas, lo que entrega información indispensable para definir la frecuencia mínima de medición de las variables de control que pueda dar cuenta de eventuales alteraciones. Por ejemplo, si el impacto es el descenso del nivel de la napa y se producirá con tasas milimétricas al mes, la frecuencia de medición puede definirse como trimestral o semestral. Si por el contrario, la tasa de descensos es del orden de metros al mes, una frecuencia de medición adecuada puede ser diaria o incluso continua.

³⁴ Recomendaciones adicionales para seleccionar la localización de pozos de observación se incluyen en el Anexo A7.

6.2

OBRAS Y/O ACCIONES ASOCIADAS AL PLAN DE SEGUIMIENTO DE LAS VARIABLES AMBIENTALES

Dentro del PSVA es frecuente que se consideren ciertas obras y/o acciones³⁵ orientadas a evitar oportunamente que se produzcan impactos ambientales sobre un receptor mayores a los definidos durante el proceso de evaluación ambiental, como consecuencia de un comportamiento de las variables ambientales evaluadas diferente a lo proyectado³⁶. Esta situación debiera ser detectada por el PSVA.

En este caso el rol de la modelación consiste en definir objetivamente, en base a criterios cualitativos y cuantitativos, los indicadores de estado asociados a los potenciales impactos sobre el receptor, los criterios de decisión para implementar las acciones y las características de diseño de las obras y/o acciones que permitan cumplir los objetivos propuestos.

Indicadores de estado: los indicadores de estado corresponden a parámetros específicos (por ejemplo, el nivel del agua subterránea) asociados a ciertos puntos de control ubicados de tal forma de anticipar potenciales impactos. Respecto de los parámetros, éstos debieran coincidir con los parámetros objetivo definidos en el PSVA, o al menos con una parte de éstos. En cuanto a la ubicación de los puntos de control, éstos debieran cumplir con tres condiciones: i) ser un subconjunto de los puntos de observación del PSVA; ii)

ubicarse fuera del receptor y, iii) estar en la ruta que seguiría un potencial impacto entre la fuente y el receptor. A través de las simulaciones es posible seleccionar los puntos de monitoreo más adecuados que cumplan con las condiciones recién mencionadas.

Criterios de decisión (umbrales): Dado que el modelo debe ser capaz de representar el funcionamiento del sistema hidrogeológico frente a diferentes condiciones, es posible determinar qué condiciones en los indicadores de estado podrían dar cuenta de un comportamiento de las variables ambientales distinto al proyectado y, a partir de éstas definir los criterios de decisión que permitan activar o desactivar las acciones inmediatas necesarias para evitar la generación de impactos.

Obras y/o acciones: La utilización del modelo para diseñar las obras y/o acciones resulta imprescindible, ya que es posible simular el efecto de éstas y, por lo tanto, se puede cuantificar el efecto esperado y su velocidad de acción (tiempo de respuesta). A modo de ejemplo, la modelación permite diseñar acciones como la disminución del bombeo, indicando la tasa de disminución, el tiempo en que la acción tiene un efecto y el tiempo que debería estar funcionando para recuperar la condición evaluada.

6.3

ACTUALIZACIÓN DEL MODELO Y DEL PLAN DE SEGUIMIENTO DE LAS VARIABLES AMBIENTALES

La información recopilada en el PSVA a lo largo del tiempo puede ser utilizada para realizar mejoras en la conceptualización del sistema y actualizar el modelo numérico³⁷. Lo anterior permite reducir la incertidumbre asociada a las predicciones y puede ser utilizado para corroborar la idoneidad del PSVA propuesto inicialmente y actualizarlo si corresponde. Esta etapa es

fundamental para aumentar la confianza en las predicciones realizadas con un modelo, especialmente cuando se hacen a largo plazo, por lo que se recomienda encarecidamente que sea considerada como parte del seguimiento.

La frecuencia con la cual debería ser actualizado el modelo dependerá de cada caso.

³⁵ En algunos casos estas obras y/o acciones se incluyen como parte de un Plan de Alerta Temprana.

³⁶ La necesidad de contemplar obras y/o acciones inmediatas que eviten la generación de impactos, es sin perjuicio de que en caso que las variables evaluadas y contempladas en el plan de seguimiento sobre las cuales fueron establecidas las condiciones o medidas, hayan variado sustantivamente en relación a lo proyectado o no se hayan verificado, se pueda proceder a la revisión de la Resolución de Calificación Ambiental con el objeto de adoptar las medidas necesarias para corregir dichas situaciones (artículo 25 quinquies Ley N° 19.300).

³⁷ El modelo numérico puede ser actualizado realizando los mismos análisis (cuantitativos y cualitativos) llevados a cabo en la calibración y validación para evaluar el ajuste entre las nuevas variables observadas y las variables simuladas.

7

GLOSARIO

Aguas subterráneas: aguas que están ocultas en el seno de la tierra y no han sido alumbradas.

Absorción: disolución o mezcla de una sustancia en forma gaseosa, líquida o sólida, con agua subterránea.

Acuífero: formación geológica permeable susceptible de almacenar agua en su interior y ceder parte de ella.

Acuicludo: unidad de bajo almacenamiento y prácticamente nula transmisividad.

Acuífero anisotrópico: medio poroso en el que las propiedades hidrogeológicas dependen de la dirección considerada.

Acuífero confinado: es aquel en que el agua alojada en el interior de la zona saturada se encuentra a una presión mayor que la atmosférica.

Acuífero heterogéneo: medio poroso que tiene distintas características físicas en diversas zonas de su extensión.

Acuífero homogéneo: medio poroso que tiene características físicas uniformes en toda su extensión.

Acuífero isotrópico: medio poroso en el que las propiedades hidrogeológicas son independientes de la dirección considerada.

Acuífero libre: es aquel en que el agua de la zona saturada se encuentra en contacto directo con la atmósfera a través de los espacios de la zona saturada.

Acuífugo: unidad que no permite ni el almacenamiento ni la transmisión de agua.

Acuitardo: unidad que permite el almacenamiento de agua, pero que tiene una limitada capacidad para transmitirla, haciendo inviable su explotación.

Adsorción: adherencia de moléculas en solución a la superficie de sólidos.

Advección: mecanismo de transporte de una sustancia como producto exclusivamente del arrastre que genera el flujo.

Almacenamiento específico: volumen de agua liberado o almacenado por un acuífero de espesor y área unitaria por unidad de variación del nivel piezométrico.

Análisis de sensibilidad: procedimiento basado en la variación sistemática de los parámetros para identificar aquellos que causan las variaciones más significativas en el modelo y para evaluar cuantitativamente su incerteza en el grado de calibración y resultados del modelo.

Calibración: proceso de comparación entre valores observados y simulados, realizando cambios en el modelo a objeto de que las variables simuladas se acerquen a las observadas, evitando así inconsistencias.

Capacidad de campo: razón entre el volumen de agua retenido después del drenaje por gravedad y el volumen total de un suelo o roca.

Celda: unidad de representación espacial (1D, 2D o 3D) de un modelo numérico, discreta y de propiedades homogéneas; también llamada elemento.

Código: conjunto de instrucciones lógicas representadas en un determinado lenguaje de programación que permite la resolución de las ecuaciones que gobiernan los fenómenos (o parte de ellos) que describen el movimiento y/o calidad de las aguas subterráneas.

Coefficiente de almacenamiento: volumen de agua liberado o almacenado por un acuífero de determinado espesor y área unitaria por unidad de variación del nivel piezométrico.

Condición de borde: representación matemática que especifica la variable dependiente (carga hidráulica o concentración o sus derivadas) en los límites del dominio del modelo y permite la resolución de las ecuaciones gobernantes del sistema.

Condiciones iniciales: valores específicos para las variables dependientes (niveles piezométricos o concentraciones) en todo el dominio al comienzo del período de simulación.

Conductancia: parámetro que representa la facilidad para transmitir el flujo entre dos celdas de un modelo.

Conductividad hidráulica: capacidad de un medio poroso para transmitir agua. Depende de las características del medio, de la masa específica y viscosidad del agua, y corresponde a la constante de proporcionalidad de la Ley de Darcy.

Difusión: mecanismo de transporte de una sustancia como producto del gradiente de concentraciones existente, siguiendo la Ley de Fick.

Discretización: proceso de subdivisión del modelo continuo, o del tiempo, en segmentos discretos, celdas o elementos, sobre los cuales se aplican las ecuaciones gobernantes del sistema.

Dispersión: proceso por el cual algunas moléculas de agua viajan a una velocidad mayor o menor respecto a la velocidad promedio del agua subterránea, esparciendo el soluto en la dirección del flujo (dispersión longitudinal) y perpendicular a éste (dispersión transversal).

Dispersividad: propiedad anisotrópica de un acuífero, dependiente de la escala, que determina el grado en que una sustancia se esparce en el flujo de agua subterránea.

Error residual: diferencia entre los valores calculados y observados de una variable en un punto y tiempo determinado.

Gradiente hidráulico: cambio en el nivel piezométrico por unidad de distancia en un punto dado y en dirección del flujo subterráneo.

Grilla: sistema de nodos conectados, distribuidos sobre el dominio de modelación, que forman celdas o elementos.

Layer o capa: representación en el modelo numérico de una superficie horizontal de un espesor variable. Generalmente está asociada a un estrato definido en el modelo conceptual.

Ley de Darcy: ecuación que describe el flujo a través de un medio poroso, relacionando el caudal con la pérdida de energía hidráulica entre dos secciones del escurrimiento a través de una constante de proporcionalidad (conductividad hidráulica).

Método de las diferencias finitas: técnica de discretización numérica para resolver ecuaciones diferenciales parciales, reemplazando el dominio continuo de interés por una grilla rectangular y expresando las derivadas como diferencias.

Método de los elementos finitos: técnica de discretización numérica similar a las diferencias finitas, con la excepción que en vez de una grilla rectangular se tienen elementos que pueden tener formas irregulares y que las ecuaciones diferenciales son aproximadas usando el método de los residuales ponderados para obtener el conjunto de ecuaciones algebraicas a resolver.

Modelación inversa: método de calibración de un modelo usando un código numérico en conjunto con un algoritmo de optimización para variar sistemáticamente los parámetros, con el objetivo de minimizar los errores residuales y/o estadísticos.

Modelo: instrumento que representa una aproximación a la realidad. Pueden ser físicos, análogos, analíticos o numéricos.

Modelo analítico: es una solución exacta de la ecuación diferencial que representa el movimiento del agua subterránea aplicada a un dominio cuyas condiciones de borde e iniciales son conocidas. Generalmente responde a una conceptualización muy simplificada del sistema acuífero.

Modelo conceptual: consiste en una descripción cualitativa de la hidrología (recargas, descargas), de la hidrogeología (dominio, unidades estratigráficas, parámetros hidrogeológicos, recargas, descargas) y de su respuesta frente a las variables forzantes.

Modelo en régimen permanente: modelo que simula condiciones de equilibrio del balance hídrico en el sistema acuífero y, por lo tanto, no considera cambios en el tiempo de sus variables dependientes (niveles y flujos).

Modelo en régimen transiente: modelo que simula un intervalo de tiempo determinado, el que involucra cambios en las variables forzantes y consecuentemente cambios en las variables dependientes (niveles y flujos) del balance hídrico del sistema acuífero.

Modelo hidrogeológico: estructura coherente que permite la transferencia de un sistema hidrogeológico natural complejo en un modelo, que comprende una etapa de calibración, validación y evaluación, y que permite su utilización para la predicción de impactos naturales y antropogénicos.

Modelo matemático: se obtiene al aplicar las leyes de conservación de la masa y la ecuación de Darcy al flujo de agua a través de un volumen de suelo, lo cual se traduce en una ecuación diferencial cuyas incógnitas son la carga hidráulica y las concentraciones másicas. La solución a la ecuación de flujo se obtiene al aplicarla a un dominio cuyas condiciones de borde y condición inicial son conocidas. Con esta solución se puede predecir el comportamiento del agua subterránea (carga, velocidad, calidad) frente a estímulos futuros (cambio en las condiciones de borde). Dos tipos de soluciones son las más usadas: soluciones analíticas, también llamadas modelos analíticos, y soluciones numéricas, también denominadas modelos numéricos.

Modelo numérico: solución aproximada de una ecuación diferencial en un dominio representado por elementos o celdas discretas, cuyas condiciones de borde e iniciales son conocidas. Se obtiene la solución en los puntos (nodos) del dominio representativos de las celdas o elementos.

MODFLOW: código base de un modelo numérico de flujo desarrollado por el United States Geological Survey (USGS), ampliamente utilizado en todo el mundo para la modelación de aguas subterráneas.

Nodo: ubicación dentro del dominio de un modelo numérico, donde las variables dependientes (niveles piezométricos y/o concentraciones) son calculadas.

Número de Courant: número adimensional definido como el cociente entre el intervalo de tiempo y el tiempo de residencia en un volumen finito.

Número de Péclet: número adimensional que da cuenta de la importancia relativa de cada mecanismo de transporte (advectivo o difusivo).

Observaciones: estimaciones, mediciones o cálculos de niveles piezométricos, flujos o concentraciones, utilizadas para calibrar y evaluar el ajuste del modelo.

Periodo de stress: intervalo de tiempo en que las variables forzantes del sistema acuífero se mantienen constantes (en particular las recargas y descargas impuestas). Pueden ser regulares dentro del horizonte de modelación (por ejemplo todos mensuales) o irregulares (por ejemplo todos mensuales en un inicio, seguido luego de un lapso de tiempo de todos anuales).

Piezometría: superficie tridimensional que representa la presión de la columna de agua.

Porosidad: razón entre el volumen de espacios vacíos y el volumen total considerado de roca o sedimentos.

Propiedades hidráulicas: propiedades de un medio poroso o rocas que determinan su capacidad para almacenar y transmitir agua.

Radio de influencia: distancia alrededor de un pozo sobre la cual el nivel piezométrico ha cambiado como resultado del bombeo o inyección.

Recarga: proceso en el cual se agrega agua a la zona saturada de un acuífero, usualmente como producto de la precipitación.

Sistema de aguas subterráneas: conjunto de acuíferos y unidades confinantes en las cuales el agua se almacena y mueve, los cuales están limitados por una unidad confinante basal que no permite flujo vertical y por una zona de interacción con la superficie terrestre y cuerpo de agua superficiales.

Software: aplicación que permite a un usuario interactuar con un determinado código (o conjunto de éstos), facilitando el ingreso de los datos y la obtención y representación de la solución.

Sorción: término general utilizado para describir la asociación de una sustancia disuelta o gaseosa con el suelo (incluye procesos de absorción y adsorción).

Stick up o sobresaliente: punto de referencia sobre la superficie del terreno donde se encuentra la cota del pozo.

Transmisividad: producto entre la conductividad hidráulica y el espesor saturado del acuífero por el cual se mueve el agua subterránea, dando cuenta del volumen de agua que se mueve por unidad de tiempo, por unidad de gradiente hidráulico y por unidad de ancho.

Validación: prueba sobre la aplicabilidad del modelo, en la que se revisa si los valores simulados reproducen razonablemente un conjunto de datos independiente del conjunto de registros utilizados durante la calibración.

Zona no saturada: zona entre la superficie de la tierra y la superficie de la zona saturada de un acuífero libre. El agua en esta zona se encuentra generalmente a una presión menor que la atmosférica y los vacíos en el medio poroso pueden contener aire u otros gases. En esta zona, tanto la presión como la conductividad hidráulica dependen del contenido de humedad del suelo.

Zona saturada: parte de la sub-superficie en la cual todos los vacíos están llenos de agua bajo una presión mayor a la atmosférica.

8

REFERENCIAS

Brassington, R. (1988). Field Hydrogeology. Geological Society of London Handbook Series. Open University Press.

Chapelle F. H. (2007). Geochemistry of Groundwater. in Drever, J.I., ed., Surface and Ground Water, Weathering and Soils, Treatise on Geochemistry, Volume 5.

Custodio E. y M. R. Llamas (1983). Hidrología Subterránea. Omega. 2359 pp.

Drever, J., (1997). The Geochemistry of Natural Waters. Prentice Hall, Third Edition. Pp. 1 – 146.

Hill, M.C., y Tiedeman, C.R., (2007). Effective Groundwater Model Calibration: With Analysis of Data, Sensitivities, Predictions, and Uncertainty: Wiley and Sons, 464 p.

Holzbecher, E. & Sorek, S. (2005). Numerical Model of Groundwater Flow and Transport. Encyclopedia of Hydrological Sciences. John Wiley & Sons, Ltd.

Kinzelbach, W. (1989). Groundwater Modelling - An Introduction with Sample Programs in BASIC. Amsterdam: Tercera Edición, Elsevier Science Publishers.

Knödel Klaus, Lange Gerhard y Voigt Hans-Jürgen. (2007). Environmental Geology, Handbook of Field Methods and Case Studies. Ed.: Springer Berlin Heidelberg New York. ISBN 978-3-540-74669-0. Pp. 1374.

Leake, S.A., y D.V. Claar (1999). Procedures and Computer Programs for Telescopic mesh Refinement using MODFLOW. USGS Open-File Report 99-238. Tucson, AZ.

Middlemis, H. (2002). CD Proceedings of the IAH International Groundwater Conference. Groundwater modelling guidelines for Australia – An Overview of the Need for and use of the Guidelines . Darwin, Australia.

Middlemis, H., (2000). Murray-Darling Basin Commission. Groundwater Flow Modelling Guideline. Aquaterra Consulting Pty Ltd, South Perth, Western Australia. Project no. 125.

Morris, D. A., y Johnson, A. I. (1967). Summary of Hydrologic and Physical Properties of Rock and Soil Materials as Analyzed by the Hydrologic Laboratory of the U. S. Geological Survey. U. S. Geol. Surv. Water Supply Paper 1839-D.

Painter, S.L., et al. (2007). Enhanced Characterization and Representation of Flow through Karst Aquifers – Phase II. Contract Report to the Edwards Aquifer Authority and the Southwest Florida Water Management District.

Riegger, J. (2004). Proc. FEM_MODFLOW Conference. Hydrogeological Models - A consistent Framework for the Generation of Groundwater Models. Carlsbad, Czech Republic.

Ritz, W. (1909). Über eine Neue Methode zur Lösung Gewisser Variationsprobleme der Mathematischen Physik. Journal für die Reine und Angewandte Mathematik.

Spitz K., Moreno J. (1996). A Guide to Groundwater and solute Transport Modeling. New York: John Wiley & Sons.

UNC (2005). Groundwater Flow Model and Remedial System Design Report. Airport Road Waste Disposal Area, Chapel Hill, North Carolina. The University of North Carolina Chapel Hill.

Vázquez-Suñe Enric, (2009). Hidroquímica. Capítulo 7 del libro: Hidrogeología. Conceptos básicos de Hidrología Subterránea. Editor Comisión Docente Curso Internacional de Hidrología Subterránea. Publicado por Fundación Centro Internacional de Hidrología Subterránea (FCIHS).

Villanueva e Iglesias, (1984). Pozos y Acuíferos. Instituto Geológico y Minero de España. Ibergesa, Madrid.

GUÍA PARA EL USO DE MODELOS DE AGUAS SUBTERRÁNEAS EN EL SEIA

ANEXOS

ÍNDICE DE CONTENIDOS

A1	TEORÍA DE LA MODELACIÓN DE FLUJO Y TRANSPORTE DE SOLUTOS EN AGUAS SUBTERRÁNEAS	4
A1.1	ANTECEDENTES GENERALES	4
A1.2	MODELOS NUMÉRICOS	4
A1.2.1	Método de las diferencias finitas	5
A1.2.2	Método de los elementos finitos	6
A1.3	MODELOS HIDROGEOLÓGICOS	6
A1.4	PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS DE FLUJO	7
A1.4.1	Conductividad hidráulica	7
A1.4.2	Porosidad	9
A1.4.3	Coefficiente de almacenamiento	10
A1.4.4	Transmisividad	12
A2	SELECCIÓN DE CÓDIGO/SOFTWARE	13
A2.1	LISTADO REFERENCIAL E INFORMACIÓN GENERAL	13
A2.2	CÓDIGOS Y SOFTWARE RECOMENDADOS PARA CHILE Y SUS CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES	16
A2.2.1	Códigos y Software para simular flujo	16
A2.2.2	Códigos y Software para simular transporte de solutos	18
A3	MODELO CONCEPTUAL	20
A3.1	RECOPIACIÓN DE ANTECEDENTES	20
A3.2	ESTUDIO GEOLÓGICO	20
A3.3	ESTUDIO HIDROLÓGICO	21
A3.4	ESTUDIO HIDROGEOQUÍMICO	23
A3.4.1	Validación de la información	23
A3.4.2	Representación gráfica en forma de diagramas	24
A3.4.3	Análisis estadístico de la información	24
A3.4.4	Mapas hidrogeoquímicos	24
A3.4.5	Balances máscicos	25
A3.4.6	Isotopía	25
A3.5	ESTUDIO HIDROGEOLOGICO	25
A3.5.1	Catastro de pozos y piezometría	25
A3.5.2	Unidades hidrogeológicas	26
A3.5.3	Recarga y descarga	26
A3.5.4	Parámetros hidrogeológicos	27
A3.6	REPRESENTACIÓN DEL MODELO CONCEPTUAL	29
A3.6.1	Tablas	29
A3.6.2	Gráficos	30
A3.6.3	Imágenes	30
A3.6.4	Catastros	30
A3.6.5	Planos	31
A4	RECOMENDACIONES SOBRE LA GEOMETRÍA EN EL MODELO NUMÉRICO	32
A4.1	DOMINIO Y REFINAMIENTO	32
A4.2	ORIENTACIÓN	32
A4.3	CRITERIOS PARA LA DISCRETIZACIÓN	33
A5	UTILIZACIÓN DE LAS CONDICIONES DE BORDE PARA EVALUACIÓN AMBIENTAL	35
A6	ESTADÍSTICOS PARA EL ANÁLISIS CUANTITATIVO	38
A7	UBICACIÓN DE POZOS PARA EL PLAN DE SEGUIMIENTO AMBIENTAL	39
A7.1	POZOS DENTRO DEL ÁREA DE INFLUENCIA	39
A7.2	POZOS FUERA DEL ÁREA DE INFLUENCIA	39

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de diferencias finitas	5
Figura 2. Comparación esquemática de dominio y discretización entre (a) elementos finitos y (b) diferencias finitas	6
Figura 3. Desarrollo de un modelo hidrogeológico, abstracción y simplificación (adaptado de Riegger, 2004)	7
Figura 4. Determinación del mapa de conductividades inicial	28
Figura 5. Cotas y longitudes de interés en un pozo de observación	29

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Valores referenciales para la conductividad hidráulica K (Brassington, 1988).....	8
Tabla 2. Porosidad de drenaje n_d o coeficiente de almacenamiento de acuíferos libres (Morris y Johnson, 1967).....	10
Tabla 3. Coeficiente de almacenamiento para distintos tipos de acuíferos según material de relleno (Villanueva e Iglesias, 1984)	11
Tabla 4. Listado referencial de códigos y <i>software</i> junto con sus principales atributos	14
Tabla 5. Valores de error admisible para valores de conductividad eléctrica del agua (Modificado de Custodio y Llamas, 1983)	24
Tabla 6. Criterios para la discretización de un modelo hidrogeológico (Spitz y Moreno, 1996)	33

A1

TEORÍA DE LA MODELACIÓN DE FLUJO Y TRANSPORTE DE SOLUTOS EN AGUAS SUBTERRÁNEAS

A1.1 ANTECEDENTES GENERALES

Un modelo es una representación aproximada y simplificada de la realidad. En el ámbito de las aguas subterráneas, dada la usual escasez de información y complejidad inherentes a distintas escalas, la modelación ha asumido un rol protagónico en la resolución de una amplia variedad de problemas.

La complejidad de un modelo depende principalmente de los fenómenos que se quieren representar y de la precisión deseada. Por lo tanto, resulta trascendental establecer claramente los objetivos y alcances que tendrá un determinado modelo, con la finalidad de decidir eficientemente la metodología y el enfoque de la simulación.

Los modelos pueden ser físicos, análogos, conceptuales o matemáticos (analíticos o numéricos). Los modelos físicos intentan reproducir un sistema real en uno de menor escala (por ejemplo, una columna de suelo); los modelos análogos se utilizan para emular sistemas hidrogeológicos; los modelos conceptuales intentan reconocer las características más importantes de un sistema, sin llegar a cuantificarlo y, por último, los modelos analíticos y numéricos responden a una formulación matemática de los fenómenos de interés que permite cuantificarlos.

La habitual complejidad de un sistema hidrogeológico, junto a la disponibilidad tecnológica, ha permitido situar a los modelos numéricos como los más utilizados en la mayoría de los problemas reales. Por su parte, aplicar modelos analíticos sólo es posible para ciertas situaciones muy idealizadas, aunque muchas veces permiten una descripción razonable del problema.

A1.2 MODELOS NUMÉRICOS

A diferencia de los métodos analíticos, los modelos numéricos permiten la resolución de cualquiera de las ecuaciones que describen los procesos físicos que gobiernan el movimiento y composición de las aguas subterráneas, sin necesidad de simplificaciones ni supuestos mayores, pero condicionados por la capacidad de cálculo y por la solución, que no será exacta, sino una aproximación que depende de la discretización espacial y temporal escogidas.

Sin embargo, la aplicabilidad de los modelos numéricos queda sujeta al cumplimiento de los supuestos adoptados en las formulaciones. Por ejemplo, la validez de la Ley de Darcy para medios porosos generalmente se cumple debido a las bajas velocidades a las que se mueve el agua subterránea, por el contrario, en medios fracturados las ecuaciones gobernantes para medios porosos dejan de ser válidas y, aunque existen *software* que tratan estos sistemas, en la práctica es común hacer uso de modelos convencionales para resolver dichos problemas mediante el ajuste de los parámetros hidráulicos.

En términos generales, existen tres tipos de metodologías para la resolución numérica de ecuaciones diferenciales parciales: *método de las diferencias finitas*, *método de los elementos finitos* y *método de los volúmenes finitos*. En la práctica, los dos primeros son los que han sido mayormente aplicados a problemas de aguas subterráneas y que serán brevemente explicados a continuación.

A1.2.1 Método de las diferencias finitas

En este método las derivadas parciales son aproximadas por cocientes incrementales. Si bien resulta un método intuitivo y de fácil implementación, presenta el inconveniente de requerir de un dominio rectangular sobre el cual se extiende una grilla (no necesariamente equiespaciada). En dicha grilla ciertos nodos tienen valores conocidos (condiciones de borde o iniciales), los cuales permiten resolver el valor de la función buscada para el resto de los nodos.

La Figura 1 muestra el grillado típico del método de diferencias finitas. En este caso, la dirección x representa la coordenada espacial de flujo (coordenada i) y la dirección y representa el tiempo (coordenada j). Para resolver el valor del nodo (i, j) se requiere conocer la solución en sus nodos vecinos.

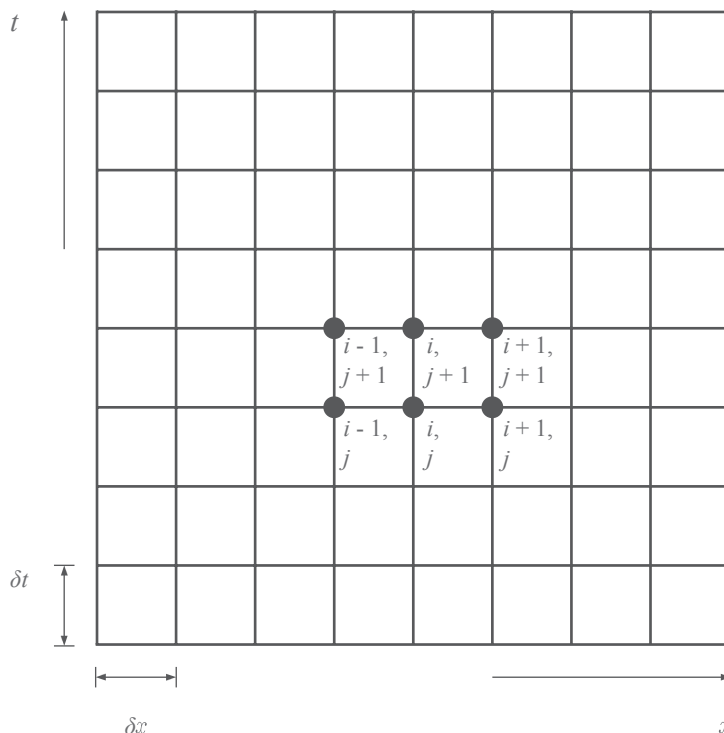


Figura 1: Esquema de diferencias finitas.

La discretización temporal y espacial determina la convergencia y estabilidad del método, junto con la bondad de su solución.

El método de las diferencias finitas se puede resolver mediante distintos esquemas, dependiendo de los nodos seleccionados para hacer los cálculos (una diferencia para un cierto nodo se puede hacer considerando el nodo siguiente o bien el nodo anterior), dando origen a dos grandes grupos: *los esquemas explícitos* y *los esquemas implícitos*.

Los esquemas explícitos permiten determinar el valor de cada nodo inmediatamente a partir de los nodos vecinos, mientras que para los esquemas implícitos lo anterior no es posible, (dado que, por ejemplo, para determinar la solución en un tiempo t_1 se requiere también la solución en un tiempo t_2 posterior) lo cual frecuentemente requiere la resolución de grandes sistemas lineales. Aunque los esquemas implícitos son incondicionalmente estables, ello no significa que su solución sea la más cercana a la solución real.

A1.2.2 Método de los elementos finitos

Este método divide el dominio de modelación en subdominios disjuntos. Cada uno de estos subdominios corresponde a un *elemento finito* y sus vértices definen los nodos sobre los cuales se realizan los cálculos.

Los elementos finitos pueden tener prácticamente cualquier geometría, pero por simplicidad usualmente se utiliza un mallado triangular. Esta característica le otorga una gran ventaja respecto a las *diferencias finitas*, ya que pueden representar de mejor forma dominios complejos y refinar la malla en zonas donde se tengan singularidades que se quieran representar con mayor detalle. La Figura 2 esquematiza lo anterior.

La formulación matemática no es tan simple como las diferencias finitas y se deriva del método de Ritz (1909), donde las ecuaciones diferenciales se reformulan en un problema variacional equivalente. A cada nodo se le asocia una función base y la solución estará dada por una combinación lineal de estas funciones base, las cuales deben ser continuas dentro del dominio y contorno de cada elemento con el objetivo de asegurar convergencia a la solución exacta.

No es objetivo de este documento detallar la formulación matemática, existiendo mucha literatura al respecto.

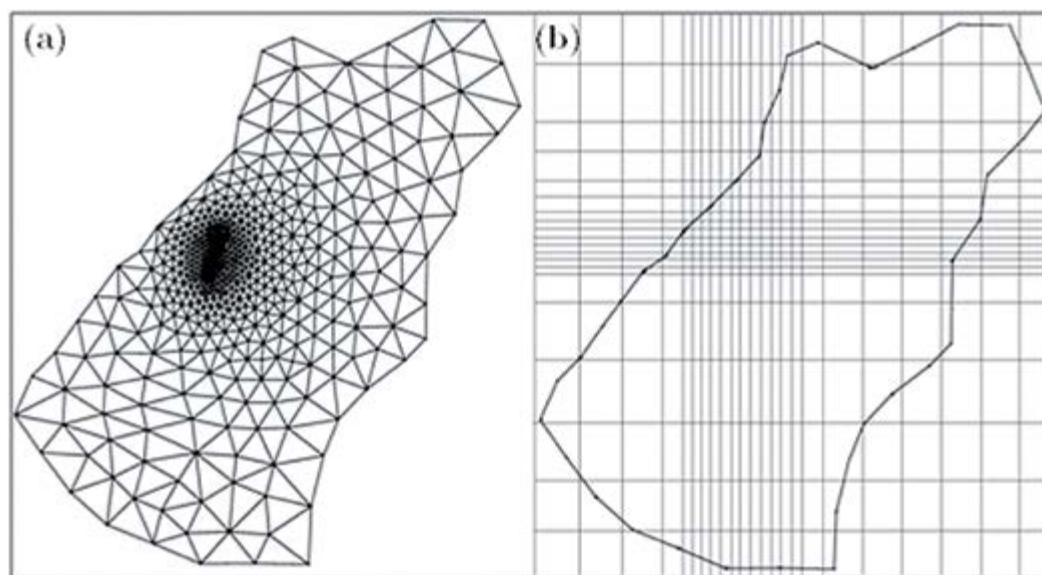


Figura 2. Comparación esquemática de dominio y discretización entre (a) elementos finitos y (b) diferencias finitas.

A1.3 MODELOS HIDROGEOLÓGICOS

Un modelo hidrogeológico es, en esencia, una representación del balance hídrico. Recientemente se ha propuesto una definición moderna y amplia de lo que debe entenderse por un "Modelo hidrogeológico". Riegger (2004) lo define como una estructura coherente que permite la transferencia de un sistema hidrogeológico natural complejo en un modelo, el cual permite a su vez una descripción cuantitativa del comportamiento hidrogeológico y de los procesos relacionados.

Este concepto amplio de modelo hidrogeológico incluye además la calibración de sus parámetros y su evaluación, de manera que se considera listo para ser usado en la predicción de los impactos naturales y antropogénicos. Como puede apreciarse, esta idea no se limita sólo a la creación de un modelo conceptual, sino que considera una evaluación cuantitativa de la aproximación del modelo y de la precisión de los resultados de las predicciones.

Debido a la naturaleza física del flujo del agua subterránea, una descripción coherente del sistema debe incluir necesariamente una caracterización de la geometría, los parámetros hidrogeológicos, las condiciones de borde e iniciales y un balance hídrico. Esta tarea no le corresponde al modelo numérico sino al modelo conceptual del sistema hidrogeológico, el cual considera la adecuada transferencia del sistema natural en un modelo y determina la precisión de la capacidad predictiva del modelo numérico.

La Figura 3 muestra esquemáticamente la transferencia de un sistema hidrogeológico real en un modelo conceptual. Antes de su aplicación, un modelo conceptual tiene que confirmar su precisión y confiabilidad, por lo que la evaluación del modelo conceptual hidrogeológico, y la cuantificación de su rango de aplicación, es una parte esencial del proceso de modelación.

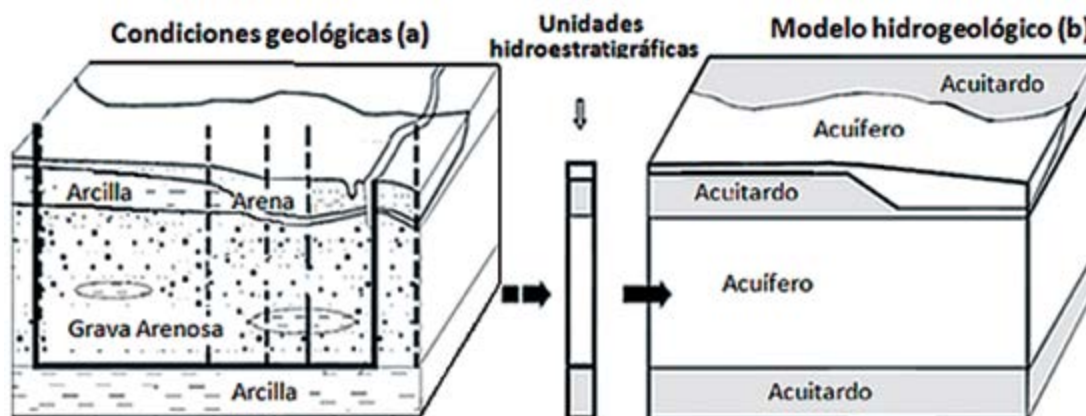


Figura 3: Desarrollo de un modelo hidrogeológico, abstracción y simplificación (adaptado de Rieger, 2004). Se aprecia (a) sistema hidrogeológico real y (b) modelo conceptual del sistema.

Un modelo hidrogeológico debe considerar, principalmente, dos aspectos: las condiciones hidrogeológicas existentes y el problema que se quiere resolver. Sobre la base de lo anterior, el arte de la modelación hidrogeológica radica en mantener el modelo tan simple como sea posible, conservando las características más relevantes del comportamiento del sistema en estudio.

A1.4 PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS DE FLUJO

En esta sección se presentan los parámetros básicos que forman parte de los modelos matemáticos utilizados para representar el movimiento de las aguas subterráneas. Estos son la conductividad hidráulica, la porosidad, el coeficiente de almacenamiento y la transmisividad.

A1.4.1 Conductividad hidráulica

La conductividad hidráulica, denotada comúnmente como “ K ”, es un parámetro que da cuenta de la habilidad del medio poroso para transmitir el agua. Presenta unidades de velocidad [L/T] y corresponde a la constante de proporcionalidad de la ecuación de Darcy, dada por:

$$Q = K \cdot A \cdot \Delta h / L \quad (1)$$

donde Q [L^3/T] es el caudal que pasa a través de una sección transversal de área A [L^2] y Δh [L] es la pérdida de carga en un tramo de longitud L [L]. La expresión $\Delta h/L$ es conocida como *gradiente hidráulico*. Esta ecuación (1) es válida para un número de Reynolds R pequeño, definido como:

$$R = \frac{\rho v d_{10}}{\mu} \quad (2)$$

donde ρ [M/L^3] es la densidad del agua; v [L/T] la velocidad de Darcy (Q/A), d_{10} [L] es el diámetro efectivo de los granos de suelo que, en análisis granulométricos, corresponde al diámetro asociado al tamiz por el cual pasa el 10% del peso de la muestra considerada y μ la viscosidad dinámica del agua [$M/(T \cdot L)$].

Si $R < 1$, entonces la relación entre Q y el gradiente hidráulico es aproximadamente lineal y la ecuación (1) es válida. Esta situación generalmente se cumple en el flujo de aguas subterráneas, salvo en circunstancias particulares, como las proximidades a obras de captación.

El rango de valores de K es muy amplio y varía desde $K = 10^{-6}$ m/d para ciertos tipos de rocas y arcillas, hasta más que $K = 100$ m/d para ciertas gravas. La Tabla 1 presenta algunos valores usualmente encontrados en la literatura.

Tabla 1. Valores referenciales para la conductividad hidráulica K (Brassington, 1988)

Tipo de suelo/roca	Conductividad hidráulica K (m/d)
Arcilla	$10^{-8} - 10^{-2}$
Limo	$10^{-2} - 1$
Arena fina	1 - 5
Arena media	5 - 20
Arena gruesa	20-100
Grava	100-1000
Esquistos	$5 \times 10^{-8} - 5 \times 10^{-6}$
Areniscas	$10^{-3} - 1$
Calizas	$10^{-5} - 1$
Basaltos	0.0003 - 3
Granitos	0.0003 - 0.03
Pizarras	$10^{-8} - 10^{-5}$

En la medida en que el acuífero sea anisotrópico, la conductividad hidráulica también lo será. Si un acuífero está compuesto por distintos estratos horizontales de distintas propiedades hidrogeológicas es posible estimar una conductividad equivalente horizontal como:

$$K_h = \sum_{m=1}^n \frac{K_{hm} \cdot b_m}{b} \quad (3)$$

y una conductividad equivalente vertical como:

$$K_v = \frac{b}{\sum_{m=1}^n \frac{b_m}{K_{vm}}} \quad (4)$$

donde K_{hm} y K_{vm} son las conductividades hidráulicas horizontal y vertical del estrato m , respectivamente, b_m es el espesor del estrato m y b es la suma de los espesores de todos los estratos.

A1.4.2 Porosidad

La porosidad, denotada comúnmente como “ n ”, es la relación entre el volumen de poros V_{poros} que existe por unidad de volumen de suelo V_{total} dado por:

$$n = \frac{V_{\text{poros}}}{V_{\text{total}}} \quad (5)$$

Se define la *porosidad cinemática* (n_e) como el volumen de poros interconectados que existe por unidad de volumen total de suelo y permiten el flujo de agua, se expresa como:

$$n_e = \frac{V_{\text{poros interconectados}}}{V_{\text{total}}} \quad (6)$$

Se define también la porosidad de drenaje o porosidad eficaz (n_d) como el volumen de agua que drena por gravedad V_d desde un volumen de suelo V_{total} inicialmente saturado como:

$$n_d = \frac{V_d}{V_{\text{total}}} \quad (7)$$

La porosidad de drenaje se conoce también como coeficiente de almacenamiento de acuíferos libres o coeficiente de libre escurrimiento y se denomina comúnmente S_y por su definición en inglés (*Specific Yield*). La Tabla 2 presenta algunos valores usualmente encontrados en la literatura.

Al igual que para la conductividad hidráulica, la porosidad varía según las características del acuífero.

Tabla 2. Porosidad de drenaje n_d o coeficiente de almacenamiento de acuíferos libres S_y (Morris y Johnson, 1967)

Acuífero	Nº de análisis	Rango	Media aritmética
Materiales sedimentarios			
Arenisca (fina)	47	0,02 – 0,40	0,21
Arenisca (media)	10	0,12 – 0,41	0,27
Limolita	13	0,01 – 0,33	0,12
Arena (fina)	287	0,01 – 0,46	0,33
Arena (media)	297	0,16 – 0,46	0,32
Arena (gruesa)	143	0,18 – 0,43	0,30
Grava (fina)	33	0,13 – 0,40	0,28
Grava (media)	13	0,17 – 0,44	0,24
Grava (gruesa)	9	0,13 – 0,25	0,21
Limo	299	0,01 – 0,39	0,20
Arcilla	27	0,01 – 0,18	0,06
Caliza	32	0,00 – 0,36	0,14
Materiales erosionables			
Loess	5	0,14 – 0,22	0,18
Arenas eólicas	14	0,32 – 0,47	0,38
Toba	90	0,02 – 0,47	0,21
Roca metamórfica			
Esquisto	11	0,22 – 0,33	0,26

A1.4.3 Coeficiente de almacenamiento

El coeficiente de almacenamiento, denotado comúnmente como “S”, se define como el volumen de agua que un acuífero es susceptible de almacenar o liberar por unidad de superficie como resultado del cambio (aumento o disminución) de una unidad en el nivel piezométrico. S es adimensional y usualmente mucho mayor en acuíferos libres ($S = 0,02 - 0,3$) que en acuíferos confinados ($S < 0,005$).

Para acuíferos confinados, S se define a partir del almacenamiento específico S_s (m^{-1}) como:

$$S = b \cdot S_s \quad (8)$$

donde b (m) es el espesor del acuífero confinado y S_s representa el volumen de agua liberado V_w por un volumen unitario de suelo por unidad de descenso de carga hidráulica ΔH dado por:

$$S_s = \frac{V_w}{\Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z \cdot \Delta H} \quad (9)$$

que también se puede estimar como:

$$S_s = \rho_w \cdot g (\alpha + n \cdot \beta) \quad (10)$$

donde ρ_w (kg/m³) es la densidad del agua, g (m/s²) es la aceleración de gravedad, n la porosidad y α (Pa⁻¹) y β (Pa⁻¹) son las compresibilidades del medio poroso y del agua.

Para acuíferos libres, el almacenamiento no solo varía por la compresibilidad del esqueleto mineral y del agua, sino también por el drenaje por acción de la gravedad, de esta forma, S se escribe como:

$$S = S_y + h \cdot S_s \quad (11)$$

donde h (m) es el espesor saturado y S_y es el coeficiente de almacenamiento de acuíferos libres o porosidad de drenaje, definido en la ecuación (7) y cuyos valores de referencia se presentan en la Tabla 2. Usualmente S_y es mucho más grande que $h \cdot S_s$.

Es importante señalar que en acuíferos libres, el efecto de vaciado de los poros no es instantáneo, produciendo un efecto de drenaje retardado que se acentúa mientras más estratificado sea el acuífero y más fina sea su granulometría. Por lo tanto, S_y no puede ser estimado mediante las metodologías comunes y deben tomarse ciertas consideraciones¹.

La Tabla 3 presenta un resumen de valores típicos (de referencia) para el coeficiente de almacenamiento, según distintos tipos de material de relleno.

Tabla 3. Coeficiente de almacenamiento para distintos tipos de acuíferos según material de relleno (Villanueva e Iglesias, 1984).

Tipo de material	Forma de funcionamiento del acuífero	Valores medios de S
Caliza y dolomías jurásicas	Libre	$2 \cdot 10^{-2}$
	Semiconfinado	$5 \cdot 10^{-4}$
	Confinado	$5 \cdot 10^{-5}$
Calizas y dolomías cretácicas y terciarias	Libre	$2 \cdot 10^{-2} - 6 \cdot 10^{-2}$
	Semiconfinado	$10^{-3} - 5 \cdot 10^{-4}$
	Confinado	$10^{-4} - 5 \cdot 10^{-5}$
Gravas y arenas	Libre	$5 \cdot 10^{-2} - 15 \cdot 10^{-2}$
	Semiconfinado	10^{-3}
	Confinado	10^{-4}
Calcarenitas marinas terciarias	Libre	$15 \cdot 10^{-2} - 18 \cdot 10^{-2}$

¹Mayor detalle en Custodio y Llamas, 1983.

A1.4.4 Transmisividad

La transmisividad, denotada comúnmente como “ T ” [m^2/s], permite estimar la cantidad de agua que puede ser transmitida horizontalmente en un acuífero confinado de espesor b , bajo un gradiente hidráulico unitario. Se define como:

$$T=b \cdot K \quad (12)$$

donde K es la conductividad hidráulica y b es el espesor saturado. Si el acuífero presenta múltiples estratos, la transmisividad total será la suma de las transmisividades de cada estrato. Para un acuífero libre la transmisividad se expresa en función del espesor saturado h como:

$$T=h \cdot K \quad (13)$$

A2

SELECCIÓN DE CÓDIGO/*SOFTWARE*

A2.1

LISTADO REFERENCIAL E INFORMACIÓN GENERAL

La Tabla 4 presenta información general de algunos códigos o *software* utilizados comúnmente en el ámbito de la modelación de flujo y transporte en aguas subterráneas, incluyendo los siguientes atributos y características principales de cada uno:

- **Nombre:** nombre del código o *software*.
- **Metodología:** corresponde al método de resolución, puede ser diferencias finitas (DF), elementos finitos (EF), volúmenes finitos (VF), método de elementos analíticos (MEA), analítico (A), semi-analítico (SA), diferencias finitas integradas (DFI) o sin información (S/I).
- **Dimensionalidad:** puede ser una dimensión (1D), dos dimensiones (2D) o tres dimensiones (3D).
- **Flujo saturado:** modela el flujo de agua subterránea en condiciones saturadas.
- **Flujo no saturado:** modela flujo de agua subterránea en condiciones no saturadas.
- **Transporte saturado:** modela el transporte de solutos en condiciones saturadas.
- **Transporte no saturado:** modela el transporte de solutos en condiciones no saturadas.
- **Remediación:** modela procesos de remediación relacionados con hidrocarburos.
- **Transporte de virus:** permite modelar el transporte de virus.
- **Transporte de calor:** permite modelar el transporte de calor.
- **Densidad variable:** permite modelar el flujo de agua considerando densidad variable.
- **Acuíferos fracturados:** permite modelar explícitamente el flujo en acuíferos fracturados.
- **Multifase:** permite modelar el flujo y transporte de soluciones multifase, no miscibles.

Tabla 4. Listado referencial de códigos y *software* junto con sus principales atributos

Código / Software	Metodología	Dimensionalidad	Flujo saturado	Flujo no saturado	Transporte saturado	Transporte no saturado	Remediación	Transporte de virus	Transporte de calor	Densidad variable	Acuíferos fracturados	Multifase
BIOPLUMEIII	DF	2D					✓					
BIOSCREEN	A	3D			✓		✓					
CANVAS	EF	2D	✓	✓	✓	✓		✓				
CHEMFLO	DF			✓		✓						
FEFLOW	EF	3D	✓	✓	✓	✓			✓	✓	✓	
FEMWATER	EF	3D	✓	✓	✓	✓						
FLOWPATH II	DF	2D	✓		✓							
FRACFLOW	DF	flujo 2D	✓		✓				✓		✓	
FTWORK	DF	3D								✓		
GFLOW	MEA	3D	✓									
GMS	EF/DF	3D	✓	✓	✓	✓	✓			✓	✓	
GROUNDWATER VISTAS	DF	3D	✓		✓				✓	✓		
HST3D	DF	3D	✓		✓				✓	✓		
HSSM	DF	2D										✓
HYDRUS 1D	EF	1D	✓	✓	✓	✓			✓			
HYDRUS 2D/3D	EF	2D 3D	✓	✓	✓	✓			✓			
MICROFEM	DF/EF	3D	✓									
MODELMUSE	DF	3D	✓		✓							
MODFLOW	DF	3D	✓									
MODFLOWT	DF	3D	✓		✓							
MODPATH	DF	3D			✓							
MODTECH	DF	3D	✓		✓							
MOTRANS	EF	2D	✓	✓	✓	✓			✓		✓	
MPNE1D	A	1D			✓							
MT3DMS	DF/VF	3D			✓							

Código / Software	Metodología	Dimensionalidad	Flujo saturado	Flujo no saturado	Transporte saturado	Transporte no saturado	Remediación	Transporte de virus	Transporte de calor	Densidad variable	Acuíferos fracturados	Multifase
MULAT	EF	3D	✓		✓							
NAPL Simulator	EF	3D										✓
PATH3D	DF	3D			✓							
PMWIN	DF	3D	✓		✓				✓	✓		
SEAWAT	DF	3D	✓		✓				✓	✓		
SEEP/W	EF	2D	✓	✓	✓	✓			✓	✓		
SEFTRAN	S/I	2D	✓		✓							
SUTRA	DF/EF	2D/3D	✓	✓	✓	✓			✓	✓		
SvFlux	EF	1D/2D/3D	✓	✓	✓	✓			✓	✓		
SWACROP	DF	1D		✓								
SWANFLOW	DF	3D	✓	✓								✓
SWICHA	EF	3D	✓		✓					✓		
SWIFT	DF	3D	✓		✓				✓	✓	✓	
TARGET	DF	2D-3D	✓	✓	✓	✓				✓		
TOUGH2	DFI	3D	✓		✓				✓		✓	
TRACR3D	DF	3D	✓		✓						✓	
TRAFRAP-WT	EF	2D	✓		✓						✓	
USGS-SOL	A	3D			✓							
VIRALT	SA	2D	✓	✓	✓	✓		✓				
VIRTUS	DF	1D		✓		✓		✓	✓			
VISUAL MODFLOW	DF	3D	✓		✓				✓	✓		
VS2DI/VS2TI	DF	1D-2D	✓	✓	✓	✓			✓			

A2.2

CÓDIGOS Y SOFTWARE RECOMENDADOS PARA CHILE Y SUS CARÁCTERÍSTICAS PRINCIPALES

De acuerdo a la revisión de distintos *software* presentada en la sección anterior, y considerando la realidad del país, se ha seleccionado un grupo (no exhaustivo) de aquellos que son recomendables para su uso en Chile. El alcance de la selección se acotó exclusivamente a aquellos enfocados a las aguas subterráneas, dejando de lado *software* integrados de procesos hidrológicos (por ejemplo *software* de la línea MIKE).

La selección diferencia entre *software* que simulan flujo y *software* que simulan además el transporte de solutos. Dentro de los *software* de flujo se distinguen a su vez las categorías de flujo en medio saturado, en medio no saturado, flujo con densidad variable y flujo en acuíferos fracturados y medios kársticos. Para los *software* de transporte de solutos se distinguen las categorías de transporte en medio saturado y medio no saturado.

A2.2.1 Códigos y Software para simular flujo

A2.2.1.1 Flujo en medio saturado

Los *software* recomendados para simular flujo en medio saturado, considerando acuíferos granulares, son los siguientes:

- **GMS:** corresponde a un *software* comercial que sustenta varios códigos, destacándose MODFLOW, MT3DMS, Seawat y Femwater entre otros. Posee una buena interfaz gráfica para pre y post procesamiento, y presenta un gran potencial para manejo de sistemas de información geográfica. En este caso se recomienda el uso del código MODFLOW, que permite simular flujo en la zona saturada del acuífero, en 3D (diferencias finitas).
- **Groundwater Vistas:** corresponde a un *software* comercial que sustenta varios códigos, destacándose MODFLOW, MT3DMS y Seawat entre otros. La interfaz es amigable y presenta funciones adecuadas para exportar e importar gran cantidad de información, como ocurre en modelos complejos. Es muy utilizado a nivel mundial y también en Chile. En este caso se recomienda el uso del código MODFLOW, que permite simular flujo en la zona saturada del acuífero, en 3D (diferencias finitas).
- **Modelmuse:** corresponde a un *software* gratuito desarrollado por el USGS que sustenta varios códigos, destacándose MODFLOW y MT3DMS entre otros. La principal ventaja es que es gratuito. En este caso se recomienda el uso del código MODFLOW, que permite simular flujo en la zona saturada del acuífero, en 3D (diferencias finitas).
- **Visual Modflow:** corresponde a un *software* comercial que sustenta varios códigos, destacándose MODFLOW, MT3DMS y Seawat entre otros. La interfaz es amigable y presenta funciones adecuadas para exportar e importar gran cantidad de información, como ocurre en modelos complejos. Es muy utilizado a nivel mundial y es uno de los más utilizados en Chile. En este caso se recomienda el uso del código MODFLOW, que permite simular flujo en la zona saturada del acuífero, en 3D (diferencias finitas).

Los *software* señalados sustentan el código MODFLOW (diferencias finitas), que permite una representación adecuada de los procesos que se dan en la condición de flujo en medio saturado en acuíferos granulares, y ha sido utilizado ampliamente a nivel mundial y en Chile. Existen otros *software* y códigos que se basan en los elementos finitos y que ciertamente pueden ser utilizados para simular flujo en medio saturado (por ejemplo, Feflow, Femwater, Hydrus y otros), sin embargo estos se detallan a continuación en relación a algunos usos más específicos en los cuales resultan particularmente útiles.

A2.2.1.2 Flujo en medio no saturado

En comparación a la modelación de flujo en medio saturado, existe una menor cantidad de *software* disponibles para la modelación de flujo exclusivamente en medio no saturado. En general los *software* son capaces de simular la zona del acuífero no saturada y saturada de manera conjunta. Los *software* recomendados son:

- **Feflow:** corresponde a un *software* comercial que posee códigos de resolución numérica integrados directamente, y que permite simular flujo en la zona saturada y no saturada del acuífero, en 2D y 3D (elementos finitos). Dispone además de una interfaz que permite construir los modelos integrando e intercambiando información GIS y CAD directamente, lo que favorece la representación de la topografía y la geometría de unidades hidrogeológicas. Su uso es recomendado en modelos complejos y cuando se requiere simular grandes extensiones que incluyen ambas zonas de un acuífero, saturada y no saturada.
- **GMS (Femwater):** Femwater corresponde a un código de dominio público, pero cuya interfaz gráfica se encuentra incluida en el *software* comercial GMS. Este código permite simular flujo en la zona saturada y no saturada del acuífero, en 3D (elementos finitos). Su uso es recomendado en modelos complejos y cuando se requiere simular grandes extensiones que incluyen ambas zonas de un acuífero, saturada y no saturada.
- **Hydrus 1D:** *software* gratuito basado en el código Hydrus, que simula flujo y transporte reactivo en la zona saturada y no saturada del acuífero, en 1D (elementos finitos).
- **VS2DI:** *software* gratuito desarrollado por el USGS basado en los códigos VS2DT y VS2DH, que simula flujo y transporte no reactivo en la zona saturada y no saturada del acuífero, en 1D y 2D (diferencias finitas).

A2.2.1.3 Flujo con densidad variable

La mayoría de los *software* para modelar flujo en condiciones de densidad variable han sido desarrollados para modelar acuíferos costeros. En términos generales, la modelación de acuíferos con cambios muy bruscos de densidad, como ocurre en salares del norte de Chile, es compleja, y los *software* pueden presentar problemas de estabilidad numérica y convergencia. El hecho de que se deban desarrollar modelos multicapas lleva a que, en muchos casos, los tiempos de simulación sean demasiado extensos. Los *software* recomendados se listan a continuación:

- **Feflow:** corresponde a un *software* comercial que posee códigos de resolución numérica integrados directamente, que resuelve el flujo y transporte de forma acoplada, y permite simular condiciones de densidad variable, en 3D (elementos finitos). Dispone además de una interfaz que permite construir los modelos integrando e intercambiando información GIS y CAD directamente, lo que favorece la representación de la topografía y la geometría de unidades hidrogeológicas. Es aplicable para acuíferos costeros y salares.
- **GMS (Femwater):** Femwater corresponde a un código de dominio público, pero cuya interfaz gráfica se encuentra incluida en el *software* comercial GMS, que además considera una resolución acoplada con el código Lewaste (solución del transporte). El *software* resuelve el flujo y transporte de forma acoplada, y permite simular condiciones de densidad variable, en 3D (elementos finitos). Es aplicable para acuíferos costeros y salares, presentando un mejor comportamiento que Seawat en condiciones de gran variabilidad de densidad.
- **Seawat:** código gratuito desarrollado por el USGS en base a los códigos MODFLOW y MT3DMS, que permite resolver el flujo y el transporte de forma acoplada, y simular flujo con densidad variable, en 3D (diferencias finitas). Es aplicable para acuíferos costeros y salares, presentando dos grandes ventajas: i) la mayoría de los *software* que funcionan con MODFLOW incluyen Seawat (por ejemplo, GMS, Groundwater Vistas y Visual Modflow) y ii) al estar basado en el código MODFLOW permite pasar de manera relativamente fácil de un modelo de una densidad elaborado en MODFLOW a uno de densidad variable elaborado en Seawat.

- **Sutra:** código gratuito desarrollado por el USGS, que permite resolver el flujo y el transporte de forma acoplada, y simular flujo con densidad variable, en 2D-3D (utiliza elementos finitos o diferencias finitas). Se encuentran disponibles aplicaciones gratuitas que permiten facilitar la modelación con Sutra, sin embargo la interfaz gráfica disponible requiere de un *software* comercial para su uso. Es aplicable para acuíferos costeros y salares.

A2.2.1.4 Flujos en acuíferos fracturados y medios kársticos

Acuíferos fracturados pueden ser encontrados prácticamente a lo largo de todo el país, particularmente en la zona norte cordillerana. Por el contrario, acuíferos kársticos son escasos y sólo se ha reconocido este tipo de comportamiento en lugares como la Laguna Cejar en el Salar de Atacama.

La modelación en este tipo de medios no porosos es compleja debido a que requiere de un conocimiento profundo de las características del acuífero y su anisotropía. Por lo anterior, una práctica usual consiste en simular estos problemas como medios porosos, lo cual es una aproximación razonable en la medida en que el dominio de modelación sea suficientemente grande. Es así como en modelos regionales o suficientemente extensos, las heterogeneidades de un acuífero fracturado o kárstico dejan de ser relevantes, y aunque al no tener un flujo laminar la ecuación de Darcy no es aplicable, los problemas suelen abordarse asumiendo constantes elásticas equivalentes.

Por el contrario, si se quiere abordar un problema local o uno donde la anisotropía generada por las fracturas y conductos no permite una buena representación asumiendo medios porosos, los enfoques más comunes utilizados asumen las tuberías discretas incorporadas en un flujo difuso (asociado a *software* que utilizan elementos finitos como Feflow); asumen zonas de bajos coeficientes de almacenamiento y altas permeabilidades (este enfoque es el que se utiliza generalmente en *software* basados en el código MODFLOW); o asumen un enfoque dual de conductividades tanto para el medio poroso como para simular los conductos, esto último puede ser incorporado a MODFLOW mediante un paquete de expansión (Painter et al., 2007).

Los *software* recomendados son:

- **Feflow:** corresponde a un *software* comercial que posee códigos de resolución numérica integrados directamente, y que permite simular flujo y transporte de forma acoplada en la zona saturada y no saturada del acuífero, en 2D y 3D (elementos finitos). Dispone además de una interfaz que permite construir los modelos integrando e intercambiando información GIS y CAD directamente, lo que favorece la representación de la topografía y la geometría de unidades hidrogeológicas. Feflow permite simular explícitamente condiciones de marcada anisotropía (túneles, drenes, fracturas, etc.) mediante elementos singulares -especiales entre los elementos finitos de la malla- que pueden incluir condiciones de flujo diferentes a la ley de Darcy.
- **GMS, Groundwater Vistas y Visual Modflow:** estos *software* comerciales sustentan varios códigos, entre ellos MODFLOW, MT3DMS y Seawat, que permiten simular flujo y transporte de solutos bajo una variedad de condiciones. Si bien en ellos no se contempla específicamente la modelación de acuíferos fracturados y medios kársticos, dependiendo del alcance de la modelación y del código que se utilice (puede ser en base a elementos finitos o diferencias finitas), se pueden adoptar distintas aproximaciones y enfoques conceptuales para representar el comportamiento de este tipo de acuíferos.

A2.2.2 Códigos y Software para simular transporte de solutos

A2.2.2.1 Transporte en suelo saturado

- **GMS:** corresponde a un *software* comercial que sustenta varios códigos, destacándose MODFLOW, MT3DMS, Seawat y Femwater entre otros. Posee una buena interfaz gráfica para pre y post procesamiento, y presenta un gran potencial para manejo de sistemas de información geográfica. En este caso se recomienda el uso de los códigos MODFLOW y MT3DMS, que permiten simular flujo y transporte en la zona saturada del acuífero, en 3D (diferencias finitas).
- **Groundwater Vistas:** corresponde a un *software* comercial que sustenta varios códigos, destacándose MODFLOW, MT3DMS y Seawat entre otros. La interfaz es amigable y presenta funciones adecuadas para exportar e importar gran cantidad de información, como ocurre en modelos complejos. Es muy utilizado a nivel mundial y también en Chile. En este caso se recomienda el uso de los códigos MODFLOW y MT3DMS, que permiten simular flujo y transporte en la zona saturada del acuífero, en 3D (diferencias finitas).

- **Modelmuse:** corresponde a un *software* gratuito desarrollado por el USGS que sustenta varios códigos, destacándose MODFLOW y MT3DMS entre otros. La principal ventaja es que es gratuito. En este caso se recomienda el uso de los códigos MODFLOW y MT3DMS, que permiten simular flujo y transporte en la zona saturada del acuífero, en 3D (diferencias finitas).
- **Visual Modflow:** corresponde a un *software* comercial que sustenta varios códigos, destacándose MODFLOW, MT3DMS y Seawat entre otros. La interfaz es amigable y presenta funciones adecuadas para exportar e importar gran cantidad de información, como ocurre en modelos complejos. Es muy utilizado a nivel mundial y es uno de los más utilizado en Chile. En este caso se recomienda el uso de los códigos MODFLOW y MT3DMS, que permiten simular flujo y transporte en la zona saturada del acuífero, en 3D (diferencias finitas).

Los *software* señalados cuentan con los códigos MODFLOW y MT3DMS (diferencias finitas). A partir del código MODFLOW se genera una solución del flujo en medio saturado, que luego se utiliza como entrada al código MT3DMS, que genera a su vez la solución del modelo de transporte de solutos (resolución desacoplada del flujo y transporte). De esta forma ambos códigos en conjunto permiten una representación adecuada de los procesos de transporte que se dan en la condición de flujo en medio saturado en acuíferos granulares, siendo ampliamente utilizados a nivel mundial y en Chile. Existen otros *software* y códigos que se basan en los elementos finitos y que ciertamente pueden ser utilizados para simular flujo y transporte en medio saturado (por ejemplo, Feflow, Femwater, Hydrus y otros), sin embargo estos se detallan a continuación en relación a su uso para medio no saturado (que incluye medio saturado).

A2.2.2.2 Transporte en medio no saturado

- **Feflow:** corresponde a un *software* comercial que posee códigos de resolución numérica integrados directamente, y que permite simular flujo y transporte de forma acoplada en la zona saturada y no saturada del acuífero, en 2D y 3D (elementos finitos). Dispone además de una interfaz que permite construir los modelos integrando e intercambiando información GIS y CAD directamente, lo que favorece la representación de la topografía y la geometría de unidades hidrogeológicas. Posee dos maneras diferentes de resolver la ecuación de transporte (forma convectiva y de divergencia) útiles para abordar diferentes problemas.
- **GMS (Femwater):** Femwater corresponde a un código de dominio público, pero cuya interfaz gráfica se encuentra incluida en el *software* comercial GMS, que además considera una resolución acoplada con el código Lewaste (solución del transporte). El *software* resuelve el flujo y transporte de forma acoplada, y permite simular flujo y transporte en la zona saturada y no saturada del suelo, en 3D (elementos finitos).
- **Hydrus 1D:** *software* gratuito basado en el código Hydrus, que simula flujo y transporte reactivo en la zona saturada y no saturada del suelo, en 1D (elementos finitos). Considera una gran variedad de reacciones físico-químicas, incluyendo reacciones en cadena, como ocurre en el ciclo del nitrógeno. La última versión (2007) incorpora al código PHREEQC en la simulación de transporte (el código combinado se conoce como HP1), y permite ampliar las capacidades en cuanto a las reacciones abarcadas.
- **Hydrus 2D/3D:** *software* comercial que simula flujo y transporte reactivo en la zona saturada y no saturada del suelo, en 2D y 3D (elementos finitos). Considera una gran variedad de reacciones físico-químicas, incluyendo reacciones en cadena, como ocurre en el ciclo del nitrógeno. La última versión incorpora al código PHREEQC en la simulación de transporte (el código combinado se conoce como HP2), y permite ampliar las capacidades en cuanto a las reacciones abarcadas.
- **VS2DI:** *software* gratuito desarrollado por el USGS basado en los códigos VS2DT y VS2DH, que simula flujo y transporte no reactivo en la zona saturada y no saturada del suelo, en 1D y 2D (diferencias finitas).

A3

MODELO CONCEPTUAL

Este Anexo pretende ahondar en ciertos aspectos metodológicos para la elaboración de modelos conceptuales de aguas subterráneas y servir de referencia para su presentación, teniendo en cuenta los flujogramas para la elaboración de los principales estudios básicos presentados en el apartado 3.2.5 de la Guía.

A3.1

RECOPIACIÓN DE ANTECEDENTES

La construcción de un modelo hidrogeológico conceptual requiere la realización de una serie de estudios básicos, partiendo por un estudio geológico, continuando con la hidrología de superficie y estudio hidrogeoquímico, para terminar con el estudio hidrogeológico propiamente tal y el marco conceptual que consolida los anteriores. Para ello se requiere de información ambiental de línea de base, lo cual normalmente involucra la revisión de estudios anteriores y la consulta en bases de datos de distintos organismos de carácter público. Los antecedentes propios del interesado/a pueden adquirir especial importancia en el ámbito del agua subterránea, en particular desde el punto de vista ambiental, cuando disponen de un seguimiento sistemático de las captaciones y sondajes propios (control de volúmenes, niveles de la napa y calidad del agua).

Dadas las capacidades computacionales actuales y la facilidad de acceso remoto a la información, se recomienda trabajar con coberturas básicas en formato digital (curvas de nivel y red de drenaje), idealmente de carácter oficial (Instituto Geográfico Militar, IGM) o bien obtenidas en terreno por el interesado (topografía de detalle) o a partir de ráster públicos (Digital Elevation Model, DEM) existentes en la web. Con lo anterior es posible estructurar la cartografía básica de la zona para la o las escalas de trabajo seleccionadas, en la cual se puede representar la información de cada uno de los estudios esenciales (geológico, hidrológico, hidrogeológico, entre otros). Las fotografías aéreas, ortofotos e imágenes satelitales constituyen antecedentes complementarios para cada uno de los estudios anteriores.

A3.2

ESTUDIO GEOLÓGICO

A partir de las etapas de recopilación de antecedentes y las campañas de terreno, el estudio geológico tiene la finalidad de caracterizar la geología de superficie y de sub-superficie si es que existe información disponible.

El objetivo principal es comprender el marco geológico y los tipos de rocas o unidades geológicas presentes en el área a modelar, su grado de consolidación y/o fracturamiento y su disposición espacial. Además, se deben analizar las relaciones de contacto entre las unidades y principalmente la delimitación del contacto superficial (y eventualmente en sub-superficie) de las unidades geológicas no consolidadas y poco consolidadas con las unidades de roca que pueden actuar como límites impermeables del sistema que se analiza.

La geología de superficie debe ser sintetizada en un mapa geológico, donde se disponen la geometría de los afloramientos y unidades litológicas en superficie, sus límites laterales (contactos) y las estructuras que afectan a las distintas unidades. La escala de este mapa geológico depende de la escala del problema a modelar y del objetivo de la modelación. Para un estudio regional probablemente bastaría con un mapa a escala 1:250.000 o 1:100.000 y para estudios de detalle esta escala podría llegar a ser 1:10.000 o incluso 1:1.000. Para la confección de modelos conceptuales para modelación de aguas subterráneas, las escalas más comúnmente utilizadas son 1:50.000, 1:75.000 y 1:100.000.

Para la confección del mapa geológico es necesario describir las unidades presentes en el área. En esta descripción es necesario caracterizar la litología, disposición, contactos, espesor (si corresponde), edad, posibles correlaciones y características particulares de cada unidad. Además, es necesario caracterizar el área geomorfológicamente y estructuralmente, poniendo énfasis en la caracterización de la geometría de las unidades y fallas geológicas descritas en el mapa geológico. La Tabla 5 de la Guía muestra los contenidos que debería incluir la descripción de la litología para un estudio hidrogeológico.

Adjunto al mapa geológico es necesario confeccionar secciones geológicas o perfiles, que den cuenta de la disposición y geometría de sub superficie de las unidades descritas. Estas secciones deben dar cuenta de la estratigrafía local y las variaciones verticales y laterales de las unidades caracterizadas, dando especial énfasis a la distribución de las unidades no consolidadas o medianamente consolidadas y a la geometría y profundidad del basamento rocoso. En la Figura 7 de la Guía se muestra un ejemplo de un perfil y mapa geológico.

En ciertos casos es posible que existan unidades geológicas que no se encuentren en la superficie y que sólo sean reconocidas en sub-superficie, para lo cual es necesario incluirlas en la descripción geológica del área, no así en el mapa geológico de superficie.

A3.3 ESTUDIO HIDROLÓGICO

Un modelo hidrogeológico es una representación física de los procesos subterráneos ocurridos dentro del ciclo hidrológico general, lo que implica que existe una estrecha relación entre ellos y los procesos hidrológicos ocurridos en superficie (precipitación y evaporación), ya que estos constituyen recargas y descargas de los sistemas acuíferos, respectivamente. En este contexto, como parte de cualquier modelación hidrogeológica es necesario caracterizar el comportamiento de las variables hidrológicas más importantes y comprender cuál es su relación con el sistema acuífero modelado.

El nivel de profundidad de la caracterización hidrológica dependerá de la combinación de dos aspectos: el nivel de detalle y extensión con que se construye el modelo hidrogeológico, y la información meteorológica disponible. El análisis de estas dos temáticas entrega pautas para definir los factores más importantes a considerar en los estudios hidrológicos, los que básicamente son:

- Definición y caracterización del área de influencia hidrológica.
- Recopilación y análisis de información.
- Estimación de recarga por precipitación.
- Estimación de descarga por evaporación.

Cabe señalar que se ha considerado parte del estudio hidrológico sólo los fenómenos ocurrientes a nivel superficial. Otras fuentes de recarga (infiltración por riego, canales, etc.) y descargas (salidas subterráneas, salidas a otros cuerpos de agua, etc.) son consideradas como parte del estudio hidrogeológico.

En primer lugar, se debe determinar el área donde se realizará la caracterización hidrológica, la que al menos debiera incluir las cuencas hidrológicas afluentes a la zona modelada. Se debe tener en consideración que la recarga, que es dependiente de la precipitación, se podría ubicar en zonas alejadas del área de emplazamiento del proyecto, lo cual es particularmente común en zonas del norte de Chile. Actualmente, la forma más simple y eficaz de trazar las cuencas hidrográficas es a través de un *software* especializado, el cual, a partir de un modelo de elevación digital (DEM), delimita la red de drenaje de una zona y las hoyas hidrográficas asociadas. Los DEM están disponibles gratuitamente en la página del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS)². Las resoluciones de los modelos de elevación digital en general son suficientes para la mayoría de los modelos hidrológicos, no obstante, si se requiere analizar cuencas pequeñas y se cuenta con topografía de detalle, éstas pueden ser trazadas gráficamente con mayor precisión.

²<http://srtm.csi.cgiar.org/>

Una vez definidas las cuencas hidrográficas afluentes al área del modelo hidrogeológico, es recomendable caracterizarlas en función de sus características geomorfológicas principales tales como superficie, altura media, curvas hipsográficas, entre otras. La Tabla 6 de la Guía presenta un encabezado tipo para la caracterización de cuencas hidrográficas en el marco de un modelo conceptual.

Ya definida el área de estudio se debe recolectar información meteorológica y fluviométrica disponible, y en base a ella caracterizar el régimen de precipitaciones y escurrimientos en la zona, junto al comportamiento de la evaporación.

En función de los objetivos del modelo hidrogeológico, se debe evaluar si es necesario realizar análisis actualizados de información hidrológica o si es posible utilizar información disponible en estudios anteriores. Idealmente, las series de información deberían mantener registros lo más cercano posible a la fecha en que se realiza la modelación, aunque en la práctica es muy difícil disponer de información completamente actualizada. En general, a escala regional, se pueden encontrar diversos estudios públicos en los cuales se analiza el comportamiento de las variables hidrológicas, siendo el más conocido el Balance Hídrico de Chile, publicado el año 1987.

Dependiendo de los objetivos del modelo hidrogeológico, puede ser necesario analizar información meteorológica de precipitaciones, temperatura, evaporación e información fluviométrica. La Tabla 7 de la Guía muestra un encabezado tipo para la descripción de las variables hidrometeorológicas.

En general, el componente del ciclo hidrológico más variable y con más incidencia en el balance hídrico es la precipitación. Un análisis de precipitación debiera establecer el tipo de régimen de precipitaciones (pluvial, nival, mixto), sus valores medios a largo plazo, la existencia de gradientes relevantes para la zona de estudio, y si la escala lo amerita, el trazado de isoyetas de precipitación media a largo plazo. Adicionalmente, para la evaluación de períodos secos o húmedos, se recomienda la elaboración de un análisis de frecuencia de precipitaciones mensuales o anuales, que determine la probabilidad de exceedencia asociada a ciertos eventos y permita su clasificación (seco, húmedo, normal). Si existe información de aforos, el análisis de escurrimientos permite acotar el margen de error en las estimaciones de recarga. Otra caracterización relevante es la tasa de evaporación potencial, la que no presenta gran variabilidad espacial o temporal, por lo tanto el análisis puede ser más restringido.

Debido a que las variables meteorológicas pueden ser fuertemente dependientes de la zona de estudio, particularmente en regiones de accidentada orografía, lo ideal es disponer de información dentro del área de estudio. Lamentablemente, muchas veces esta información es limitada o no está disponible. En caso de que haya poca información meteorológica dentro del área de estudio o ésta no exista, una buena forma de mejorar las estimaciones es considerar un área más extensa de información, en base a la cual es posible extrapolar los análisis realizados a las cuencas de interés. Ciertamente, la extrapolación añade incertidumbre a las estimaciones, aun así, constituye una metodología ampliamente utilizada en hidrología.

Por último, para la estimación de la recarga superficial existe un amplio rango de métodos disponibles, en la mayoría de los cuales la precisión en las estimaciones aumenta a medida que se dispone de un mayor nivel de información; sin embargo, también se incrementa la complejidad de la conceptualización del sistema hidrológico.

Según su nivel de complejidad, se pueden clasificar los distintos métodos en tres categorías:

- **Complejidad baja:** corresponde a una estimación gruesa de la infiltración a partir de algunos componentes del balance hídrico medidos, tales como la precipitación o la escorrentía superficial.
- **Complejidad media:** se refiere a modelos conceptuales o empíricos que integran algunas de las características de los suelos para determinar la infiltración.
- **Complejidad alta:** corresponde a la modelación física de los procesos del ciclo hidrológico superficial y sub-superficial, tomando en consideración factores como el clima, la geología, la topografía, la vegetación y el uso del suelo.

Es así como es posible aplicar desde métodos muy sencillos para la estimación de la recarga a largo plazo, como por ejemplo un porcentaje de la precipitación media anual, hasta modelos hidrológicos más complejos que representan los procesos físicos del ciclo hidrológico a escala diaria. La elección del método utilizado debe ser debidamente justificada y depende de las necesidades del modelo hidrogeológico, de la importancia de la recarga superficial dentro del balance total, de si se requieren series temporales de recarga, etc. Por ejemplo, en zonas áridas donde la recarga de precipitación es la única o más importante fuente de recursos hídricos se debería estimar la recarga de la mejor forma posible; en cambio en zonas húmedas con gran presencia de escurrimientos superficiales, como ríos o canales, la recarga por precipitación en dominios pequeños puede ser despreciable.

A3.4 ESTUDIO HIDROGEOQUÍMICO

La hidrogeoquímica de aguas subterráneas consiste en la documentación y análisis de la composición química de las aguas y en la comprensión de los procesos que afectan su estructura (Chapelle, 2005). Para estudios hidrogeológicos tiene como finalidad establecer relaciones entre las fuentes, composición, distribución y circulación del agua en los acuíferos y la geología, mineralogía y sistema de flujo de éstos (Vázquez – Suñe, 2009). Para estudios ambientales tiene como finalidad determinar la calidad química del agua para diversos usos antropogénicos y/o el impacto generado en las aguas por las actividades humanas respecto de un valor de línea base o condiciones ambientales naturales del sistema (Knödel *et al.*, 2007).

A continuación se describirán brevemente algunos aspectos generales sobre la realización de estudios hidroquímicos de aguas subterráneas.

A3.4.1 Validación de la información

Normalmente, para un estudio hidrogeológico se cuenta con información de calidad química del agua subterránea obtenida de distintas fuentes de información. En el caso de información obtenida en terreno, la calidad y precisión de los análisis químicos es fundamental, por lo que es necesario que la toma de muestras se rija por la norma NCh411/11Of.98 para el muestreo de aguas subterráneas y que los análisis sean realizados por un laboratorio certificado.

Aun si se cumple lo anterior, existe siempre incertidumbre e imprecisiones asociadas tanto al muestreo como a los análisis de laboratorio. Para acotar dicha incertidumbre y mejorar la confianza en las conclusiones obtenidas de un estudio hidroquímico, se recomienda realizar algún tipo de validación de la información de los resultados. Algunas de las comprobaciones que se pueden realizar para validar la calidad del análisis son:

A3.4.1.1 Balance Iónico

En general este es el primer criterio que se establece para el control de calidad de los datos. El balance iónico se realiza para las muestras de agua que presentan análisis de los aniones (Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- y NO_3^-) y cationes (Na^+ , Ca^{+2} , Mg^{+2} , K^+) mayoritarios. De esta forma, se debe verificar que la suma de miliequivalentes de los aniones sea igual a la suma de miliequivalente de los cationes. El error del balance iónico está dado por la siguiente ecuación:

$$\text{error (\%)} = 100 \times \frac{\sum \text{cationes} - \sum \text{aniones}}{\sum \text{cationes} + \sum \text{aniones}} \quad (14)$$

Una vez determinado el error del balance iónico se debe tener en cuenta la conductividad eléctrica de la muestra y de este modo comprobar si es aceptable o no (Tabla 5).

Tabla 5. Valores de error admisible para valores de conductividad eléctrica del agua (Modificado de Custodio y Llamas, 1983).

Conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	50 - 199	200 - 499	500 - 1999	>2000
Error admisible (%)	15	5	4	2

A3.4.1.2 Coherencia entre alcalinidad y HCO_3^-

El valor de la alcalinidad total (TAC) transformado a miliequivalentes de CaCO_3 debe coincidir con los meq/L de HCO_3^- del análisis de laboratorio. La desgasificación de las muestras puede producir cambios químicos y presentar diferencias, por lo cual la medida de la alcalinidad en terreno es preferible si han pasado más de 24 horas luego del muestreo.

A3.4.1.3 Conductividad y residuo seco

El valor de la conductividad eléctrica (CE) medida entre 18°C y 20°C de temperatura debiese ser proporcional al valor del residuo seco (Rs) a 110°C.

$$CE \left(\frac{\mu\text{S}}{\text{cm}} \right) = f \cdot Rs \left(\frac{\text{mg}}{\text{L}} \right) \quad f = 0,8 \text{ a } 1,5 \quad (15)$$

donde f es un factor de proporcionalidad que, si presenta un valor muy diferente al rango indicado, es posible que el análisis no sea correcto o que la conductividad eléctrica no haya sido bien determinada.

A3.4.2 Representación gráfica en forma de diagramas

Existe un grupo de diagramas que son muy útiles para representar los datos hidrogeoquímicos de aguas. Los más utilizados en este tipo de estudios:

- Diagramas de columnas y circulares
- Diagramas bidimensionales de dispersión
- Diagramas de Stiff
- Diagramas de Schoeller-Berkaloff
- Diagramas de Piper

A3.4.3 Análisis estadístico de la información

Las poblaciones de datos obtenidas necesitan comúnmente un nivel de tratamiento estadístico para ser interpretados, como también asegurarse de la calidad de la base de datos y los errores involucrados. Los estadísticos frecuentemente utilizados corresponden a análisis univariados (histogramas, intervalos de confianza, funciones de distribución, etc.), multivariados (matrices de correlación, análisis de componentes principales, análisis de cluster, etc.) y de series de tiempo (correlaciones, series de Fourier, etc.).

A3.4.4 Mapas hidrogeoquímicos

Además de la información puntual, es útil contar con mapas de la zona de estudio que permitan presentar e interpretar la información de forma agregada en toda la zona, diferenciando (si es posible) sectores con similares concentraciones iónicas, de relaciones o parámetros físico químicos. También en base a métodos de procesamiento de información geográfica es posible interpolar curvas de iso-concentraciones, si la distribución y cantidad de observaciones en el espacio-tiempo lo permiten.

A3.4.5 Balances máxicos

Es posible realizar balances máxicos considerando los componentes químicos del agua subterránea. Las *aguas meteóricas* que penetran en el sistema subsuperficial tienen su origen en la atmósfera donde inicialmente son muy diluidas. Los procesos de *meteorización química* corresponden a reacciones químicas que generalmente resultan de la inestabilidad termodinámica de los minerales formados en zonas más profundas al entrar en contacto con aguas meteóricas oxigenadas, de baja presión y temperatura y levemente ácidas, típicas de la zona vadosa y aguas subterráneas someras. Es por ello que los estudios de balances de masas son importantes, ya que proveen una explicación racional para la variabilidad química de las aguas subterráneas y permiten interpretar algunos de los procesos que controlan su composición (Chapelle, 2005).

A3.4.6 Isotopía

El estudio de la isotopía en las aguas subterráneas permite obtener información relevante para elaborar el modelo conceptual, el cual se relaciona con el origen y dinámica de los flujos de aguas subterráneas y superficiales. Específicamente, el estudio de los isótopos estables del agua subterránea tiene como objetivos:

- Identificar el origen del agua de recarga (río, lago, nieve, lluvia).
- Determinar la altitud de la zona de recarga.
- Deducir ciertos procesos físicos y químicos relevantes (evaporación, interacción agua - roca, etc.).
- Determinar mezclas de agua y deducir fenómenos de interacción con gases.
- Estimar tiempos de residencia.

A3.5 ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO

El estudio hidrogeológico involucra distintas actividades, las que están orientadas a caracterizar el comportamiento del sistema subterráneo.

A3.5.1 Catastro de pozos y piezometría

En primer lugar es necesario confeccionar un catastro de pozos de la zona de estudio, fundamentado en la recopilación de antecedentes (catastros previos). La información mínima necesaria para dicha actividad se incluye en la Tabla 8 de la Guía.

Siguiendo con lo anterior, resulta necesario analizar el historial de extracciones y las extracciones actuales, así como también los derechos de aprovechamiento recopilados en los antecedentes.

Con toda la información disponible es posible llevar a cabo un análisis de niveles para cada acuífero, desde la perspectiva temporal, para entender el comportamiento piezométrico y establecer tendencias, y desde la perspectiva espacial, para establecer la distribución, gradientes y sentido de escurrimiento. Es importante mencionar que se pueden tener distintos sectores de acuíferos, o bien acuíferos distintos, uno sobre otro.

Cabe destacar que una de las mayores debilidades que se observan en Chile dice relación con la confiabilidad o precisión de las cotas de terreno disponibles para pozos, y en consecuencia, de la respectiva profundidad de la napa, la cual se obtiene al substrair la profundidad medida del agua subterránea a la cota de terreno del pozo. Dicha información es básica para todo análisis piezométrico espacial (sentido de escurrimiento y gradientes) y fundamental en la modelación conceptual. De aquí la importancia de poner especial cuidado en esta variable, descartando datos particulares de cotas de pozos (cota de terreno o del *stick up*) que se traducen en una altura piezométrica que no es consistente con la piezometría o sentido de escurrimiento general del sistema.

A3.5.2 Unidades hidrogeológicas

En base al estudio geológico y al comportamiento del sistema acuífero se pueden definir unidades hidrogeológicas, las cuales pueden o no incluir más de una unidad geológica. A su vez, las unidades geológicas pueden ser subdivididas en más de una unidad hidrogeológica. Esta definición de unidades hidrogeológicas apunta a caracterizar o conceptualizar el funcionamiento hidrogeológico del sistema, por lo que resulta indispensable caracterizar potenciales acuíferos, acuitardos, acuícludos y el basamento impermeable del sistema.

La caracterización de las unidades hidrogeológicas debería incluir el tipo litológico y su relación con las unidades geológicas previamente descritas, por ende, debe considerar su disposición estratigráfica, geometría y relaciones de contacto, además de sus características hidráulicas principales como conductividad hidráulica (K), almacenamiento (S) y porosidad (n). Para cada unidad hidrogeológica estos parámetros fluctúan dentro de un rango, que debería ser escogido verificando consistencia entre los valores derivados de las pruebas, ensayos de terreno y la literatura. Además, dependiendo de los alcances y de la información disponible, podría ser relevante estimar el caudal pasante por cada unidad hidrogeológica.

Como las unidades hidrogeológicas son representadas también en el modelo numérico, es trascendental una buena interpretación en esta etapa de caracterización.

A3.5.3 Recarga y descarga

Dentro de las entradas del sistema destacan aquellas que constituyen la recarga efectiva, es decir, que hacen sostenible la explotación subterránea del medio en el largo plazo sin mermar en forma importante su volumen embalsado.

Las principales fuentes de recarga corresponden a:

- Infiltración debido a la precipitación, directamente desde la superficie del sistema o bien desde su periferia a raíz de la lluvia que cae sobre las áreas aportantes laterales y que escurren subsuperficialmente hasta llegar al acuífero.
- Infiltración por riego predial.
- Infiltración desde cauces naturales y canales.
- Entradas subterráneas provenientes de cuencas vecinas.
- Percolación de la red de agua potable.

Por su parte, las principales fuentes de descarga corresponden a:

- Afloramientos en ríos y esteros.
- Evapotranspiración.
- Descargas subterráneas hacia otras cuencas o en dirección al mar.
- Extracción mecánica (norias y pozos) y gravitacional (galerías subterráneas).

Otra entrada que podría ser relevante para establecer un balance hídrico, dependiendo de las condiciones de borde utilizadas, corresponde al flujo subterráneo desde aguas arriba en el mismo acuífero, o en otras palabras, desde fuera del sector de interés para la aplicación en estudio. Esto último no constituye recarga efectiva de acuerdo a lo señalado precedentemente. De igual forma, las salidas subterráneas hacia aguas abajo también deben ser consideradas.

A3.5.4 Parámetros hidrogeológicos

Debido a la gran dependencia y variabilidad que tienen las constantes elásticas en una zona, los valores encontrados en la literatura frecuentemente son demasiado generales, por lo que la información más certera es la derivada de pruebas de bombeo.

Aun así, esta información es comúnmente escasa, puntual y esparcida heterogéneamente en la extensión del dominio de modelación, razón por la cual es necesario interpolar de algún modo con el fin de representar la variabilidad espacial (Middlemis, 2000).

La variabilidad espacial puede ser representada utilizando herramientas que van desde técnicas geoestadísticas hasta modelos de calibración automatizados. Sin embargo, lo más utilizado es la definición de zonas de conductividad de acuerdo a la interpretación del modelo conceptual.

También es importante especificar el tipo de acuífero que se quiere representar. Por ejemplo, para un acuífero confinado tanto la transmisividad como el almacenamiento son constantes temporalmente, mientras que para un acuífero libre, la transmisividad varía, pero el almacenamiento es constante (salvo por el efecto de drenaje retardado), y para sistemas acuíferos que pueden variar su condición entre libres y confinados, tanto la transmisividad como el almacenamiento pueden variar.

A3.5.4.1 Conductividad hidráulica

Las constantes elásticas del modelo son los valores medios representativos de cada estrato. Es por esta razón que comúnmente la conductividad hidráulica vertical debería ser menor, para representar la dificultad del paso del agua a través de capas de menor conductividad (por ejemplo: arcillas), que pueden ser limitadas en espesor e irrelevantes para los flujos subterráneos horizontales, pero importantes en la dinámica de los flujos verticales. Usualmente para medios porosos saturados, la conductividad hidráulica vertical es adoptada como un porcentaje de la conductividad horizontal, lo que se justifica por la estratificación horizontal natural con que corrientemente se forman los suelos. Por lo anterior, este criterio es una aproximación adecuada en la medida que no se tenga un conocimiento más detallado del sistema acuífero, pero se debe tener presente que no es siempre efectiva. Por otra parte, en acuíferos fracturados no se tiene la situación anterior y frecuentemente se modelan como un medio poroso de características isotrópicas, cuidando el efecto que podrían tener lineamientos y otras estructuras geológicas sobre dicha isotropía. La Figura 4 esquematiza la derivación de las zonas de conductividad hidráulica adoptadas en el modelo conceptual (y más adelante en el modelo numérico) a partir de la información del mapa geológico y de pruebas de bombeo. Estos valores, posteriormente, serán calibrados dentro de los rangos definidos en el modelo conceptual.

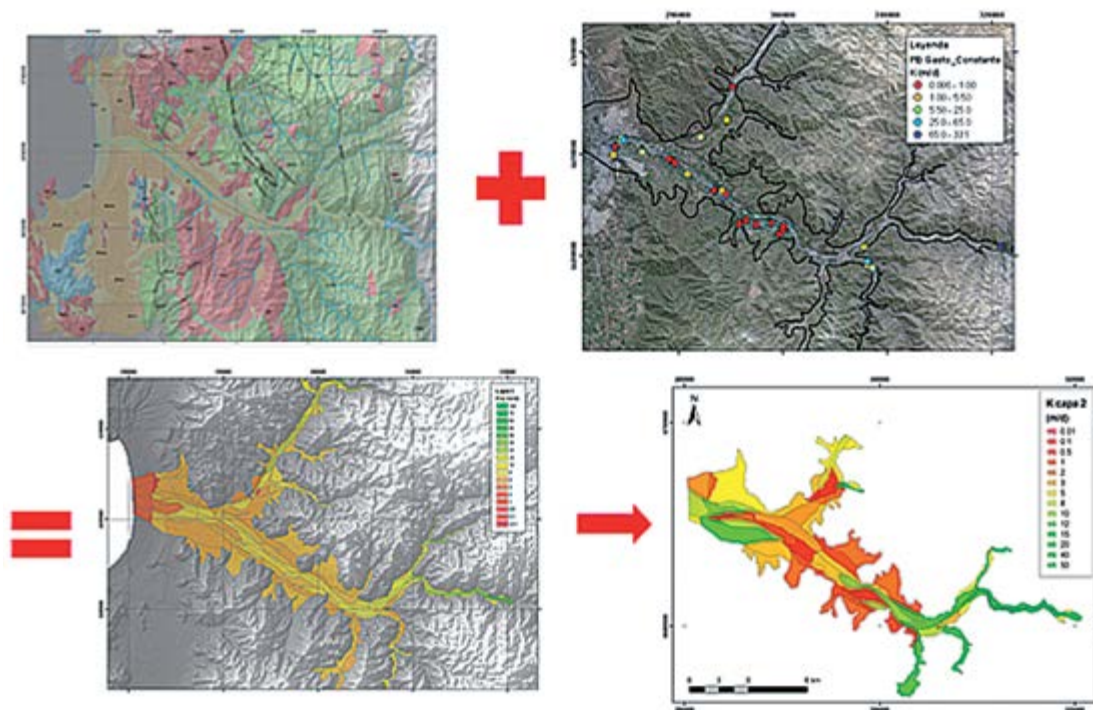


Figura 4: Determinación del mapa de conductividades inicial.

A3.5.4.2 Coeficiente de almacenamiento y porosidad

El acuífero puede liberar agua por efecto de la gravedad (S_y) o por descompresión del esqueleto elástico del suelo (S_s). Se debe tener en consideración que el modelo requiere habitualmente ambos, sin embargo, para acuíferos confinados sólo se considera en los cálculos S_s , mientras que para acuíferos libres S_y es mucho más importante.

Los valores adoptados para el coeficiente de almacenamiento a nivel de cuenca o valles deberían ser estimados para el largo plazo, intentando evitar, en principio, los valores de corto plazo que se podrían obtener a partir de pruebas de bombeo. Una aproximación que frecuentemente se utiliza cuando se cuenta con escasa información consiste adoptar las mismas zonas que para la conductividad hidráulica, asumiendo que el coeficiente de almacenamiento específico varía proporcionalmente a como lo hace la conductividad hidráulica, siempre dentro de valores físicamente posibles para el tipo de relleno presente en el acuífero.

Respecto a la porosidad, es importante señalar que ésta sólo es utilizada cuando se simulan modelos de transporte, dado que la velocidad media del agua subterránea es menor que la velocidad real.

A3.6 REPRESENTACIÓN DEL MODELO CONCEPTUAL

Los medios típicos para acompañar la descripción de los estudios básicos (geológico, hidrológico, hidrogeoquímico e hidrogeológico) y del modelo conceptual propiamente tal, corresponden a tablas, gráficos e imágenes, que comúnmente van en el cuerpo principal del informe, además de catastros y planos adjuntos en anexos.

A continuación se presentan las principales recomendaciones para aquellos medios de apoyo insertos en el cuerpo principal del informe (tablas, gráficos e imágenes).

A3.6.1 Tablas

Para todas las tablas con elementos puntuales (estaciones, pozos, etc.) donde se incluye la ubicación y/o cota, se debe indicar fuente, huso y datum (de preferencia datum WGS84).

Se hace hincapié en la ubicación y cota que acompaña los registros sistemáticos de estaciones provenientes del banco nacional de aguas BNA de la DGA, debido a que algunos datos de localización y altitud podrían presentar imprecisiones. Se recomienda utilizar información derivada del sistema SIG de la DGA, que tiene una precisión adecuada para la mayoría de los casos.

Ejemplos de tablas tipo corresponden a:

- i) Tabla de características de estaciones hidrometeorológicas y de estaciones de aguas subterráneas disponibles. Los campos principales de estas tablas son: nombre de la estación, ubicación, cota y el período de registro disponible.
- ii) Tabla de respaldo en la estimación de la piezometría para un período determinado. Los campos principales son: nombre de la estación de aguas subterráneas, ubicación, cota (hasta este punto consistente con la tabla de características generales), profundidad de la napa, fecha o período y cota piezométrica. Es indispensable que la cota piezométrica indicada provenga de la substracción entre la cota de la estación y la profundidad del agua subterránea. La Figura 5 muestra las cotas y longitudes consideradas en un pozo de observación.
- iii) Tabla de respaldo en la estimación de la cobertura de la permeabilidad y almacenamiento. Los campos principales son: nombre del pozo, ubicación y parámetros estimados por los distintos métodos considerados.

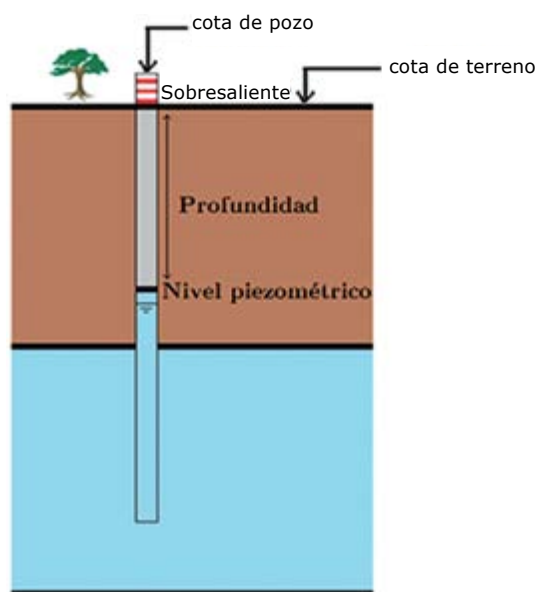


Figura 5: Cotras y longitudes de interés en un pozo de observación.

Es imprescindible que los registros de todas las tablas de pozos del texto principal sean referidos a la estimación de la piezometría o bien de las constantes elásticas, y que encuentren su equivalente en el catastro de pozos del estudio, es decir, que la tabla no tenga pozos que no figuren en el catastro y que éstos sean consistentes con la información común con este último.

A3.6.2 Gráficos

La información gráfica que debería presentarse en el desarrollo del modelo conceptual y de sus estudios básicos de respaldo, responde a un abanico muy extenso dependiendo de las variables a presentar. En términos generales, se recomienda caracterizar las variables temporales mediante series de tiempo acotadas al período de interés con una escala de tiempo real. Además, puede ser útil estimar los principales estadísticos de la serie (media, varianza, desviación estándar). Gráficos de torta son recomendados para distribuciones porcentuales, mientras que gráficos de columnas para registros categóricos.

En gráficos coordinados, la escala utilizada en ambos ejes (abscisas y ordenadas, en el caso 2D) debería ajustarse al rango de los registros presentados, permitiendo advertir las tendencias del conjunto de datos y las variaciones de menor escala. Lo anterior es particularmente importante en el análisis de series de tiempo, como por ejemplo fluctuaciones del nivel de la napa en estaciones subterráneas.

Gráficos comunes de este tipo corresponden a: niveles de la napa en estaciones seleccionadas (limnigramas de pozos), diagramas utilizados en la hidrogeoquímica (*Piper, Stiff, Schoeller – Berkloff*, etc.), y recarga cronológica al medio acuífero.

A3.6.3 Imágenes

Para una mejor comprensión se hace recomendable utilizar imágenes. Particularmente, dependiendo de lo que se desea representar, se debiesen incluir figuras a distintas escalas (por ejemplo, limitación de cuencas de interés y cuencas aportantes en el estudio hidrológico, límites del contacto lateral que delinea el acuífero, distribución espacial del basamento rocoso, lámina de ubicación de sondajes, etc.). Actualmente esto resulta fácil de conseguir mediante un *software* SIG, que permite presentar una gran cantidad de información sintetizada en una sola figura, cuidando de que sea siempre consistente con las bases de datos disponibles.

Es importante mantener la consistencia de las coberturas básicas (curvas de nivel y red de drenaje), sobre las cuales es vaciada la información derivada en los estudios básicos (geológico, hidrológico, hidrogeoquímico, hidrogeológico), es decir, es relevante no variar la fuente de estas coberturas básicas para una misma escala, situación que debe verse reflejada en las diferentes figuras del estudio.

Las figuras deben explicitar claramente la fuente de la información básica, además del huso y datum utilizado (marco del proyecto), un grillado acorde a la extensión del modelo, señalización del norte y simbología adecuada a la información que se presenta.

El datum debiera ser, de preferencia, WGS84, mientras que el huso dependerá de la localización (para Chile continental se utilizan los usos 18 y 19). La fuente puede ser indicada en el título de la figura o bien en el cuerpo del informe cuando se le referencia.

A3.6.4 Catastros

Como resultado del estudio hidrogeológico, comúnmente se elabora un catastro de captaciones existentes y un catastro de derechos de aprovechamiento, que se presentan por separado, dado que no siempre es posible ligar con facilidad la información de los catastros de derechos oficiales (DGA) con el catastro de pozos de la zona de estudio. Este último se construye, en general, a partir de catastros históricos actualizados mediante un levantamiento de terreno.

Además, resulta importante disponer de un catastro de extracciones efectivas, lo cual sólo es posible en la medida que existan comunidades de aguas.

A3.6.5 Planos

Cuando la cantidad de información y/o extensión considerada son demasiado grandes como para ser presentadas en una figura dentro del cuerpo principal del informe, es preferible utilizar planos, con el objetivo de facilitar el entendimiento de parte del lector/a. Ejemplos de planos tipo incluyen mapas geológicos y estructurales, perfiles geológicos, mapas hidrogeoquímicos, mapas de curvas de igual altura piezométrica y sentido de escurrimiento, y mapas de cobertura de permeabilidades (polígonos de igual permeabilidad o curvas de isotransmisividad), entre otros.

Al igual que en el caso de las imágenes, se hace fundamental mantener la consistencia de las coberturas básicas, que utilizan la información derivada en los estudios básicos. Los planos deben explicitar claramente la fuente de la información básica, además de huso y datum utilizado (marco del proyecto), un grillado acorde a la extensión del modelo, señalización del norte y simbología adecuada a la información que se presenta.

A4

RECOMENDACIONES SOBRE LA GEOMETRÍA EN EL MODELO NUMÉRICO

A4.1

DOMINIO Y REFINAMIENTO

Es muy frecuente que el objeto de protección ambiental sobre el cual se desean evaluar los efectos de un proyecto o actividad sea de una extensión territorial acotada. En estos casos resulta de utilidad considerar el uso de grillas telescópicas o de refinamiento local (Leake y Claar, 1999), ya que permiten utilizar las condiciones de borde a nivel de cuenca (o en una zona en donde estas son conocidas o sencillas de representar) sin la necesidad de aumentar el nivel de detalle en toda la extensión del dominio, en particular en las áreas alejadas del sistema a proteger que no necesariamente interesa representar en detalle. Lo anterior es relevante, ya que el uso de dichas condiciones de borde permite evitar imponer condiciones artificiales que podrían asociarse a una mayor complejidad y nivel de incertidumbre en los resultados, además de reducir los requerimientos computacionales y consecuentemente los tiempos de cálculo.

La elección de la geometría y discretización del dominio está determinada por el método numérico de resolución. Debido a la simpleza y popularidad del código MODFLOW, la gran mayoría de los *software* comerciales basa su motor de cálculo en las diferencias finitas (Visual Modflow, Groundwater Vistas, GMS, etc.). Para los códigos basados en diferencias finitas una buena elección de la grilla es de vital importancia, ya que el refinamiento de la grilla en un punto (x_o, y_o) conlleva el mismo refinamiento en toda la extensión de los ejes asociados a dichas coordenadas, es decir, en todos los puntos cercanos a la ordenada de x_o y la abscisa de y_o . Lo anterior no ocurre para códigos basados en elementos finitos, ya que se puede refinar una zona sin comprometer el refinamiento del dominio más amplio (ver Figura 2).

A4.2

ORIENTACIÓN

Eventualmente, podría ser conveniente considerar un cambio en la orientación (rotación) del sistema de coordenadas con la finalidad de alinear el modelo a las características de la zona de estudio y, fundamentalmente, a las direcciones principales de flujo. Los factores que inciden en la orientación son:

- **Características hidrogeológicas, hidrológicas y geológicas de la zona**

Ríos, corrientes, fallas u otros bordes naturales pueden ser simplificados a través de una apropiada orientación de la grilla. Por ejemplo, una zona de falla que afecta el flujo de aguas subterráneas es mejor representada por celdas orientadas de forma paralela y perpendicular a la falla.

- **Dirección predominante del flujo**

La descomposición del vector de velocidad según la orientación de la grilla puede producir dispersión numérica. Para minimizar lo anterior, se recomienda definir la orientación de la grilla en la misma dirección que el flujo predominante, al menos en el área de interés.

- **Anisotropía de propiedades hidráulicas**

Se mejora la precisión en la medida que la orientación del modelo siga la misma orientación que el tensor de conductividades hidráulicas, el cual queda definido por el valor de las conductividades en una determinada cara y dirección de un cierto volumen de control. En la medida que los ejes del sistema estén orientados de la misma forma que el volumen de control (o celda), éste sólo estará compuesto por sus componentes principales $(K_{x'}, K_{y'}, K_{z'})$.

A4.3 CRITERIOS PARA LA DISCRETIZACIÓN

En un modelo numérico, la discretización espacial y temporal son determinantes en la precisión y bondad de la simulación. Mientras más pequeños sean los intervalos considerados, las ecuaciones diferenciales estarán mejor aproximadas, esperándose resultados más representativos.

Sin embargo, no sólo la discretización por si sola define el éxito de un modelo, también es importante definir un correcto esquema numérico y respetar ciertas relaciones derivadas de la discretización, que podrían originar problemas de inestabilidad numérica.

Afortunadamente, la resolución numérica de las ecuaciones aplicadas al flujo y transporte de aguas subterráneas está bien documentada, de modo que es posible evitar condiciones de inestabilidad escogiendo apropiadamente ciertos parámetros o tamaños de la discretización. La mayoría de los *software* han sido creados evitando originar problemas de estabilidad, por lo cual dicha información no está disponible y, en la mayoría de los casos, no es necesaria por parte del/a usuario/a.

Algunos de los aspectos teóricos y recomendaciones prácticas que deberían considerarse al momento de definir la discretización del dominio de modelación, y que tienen relación con criterios de estabilidad numérica y convergencia se presentan a continuación en la Tabla 6.

Tabla 6. Criterios para la discretización de un modelo hidrogeológico (Spitz y Moreno, 1996).

Categoría	Criterio	Objetivo	Recomendación
Orientación de la grilla	A lo largo de la dirección principal de flujo	Minimizar dispersión numérica debido a la orientación de la grilla	
Definición de los bordes	Usar condiciones de borde adecuadas Ubicarlos lejos del área de interés de las predicciones	Prevenir influencia de los bordes sobre la solución	
Razones en la discretización	$1:10 \leq \Delta x : \Delta y \leq 10:1$	Minimizar problemas de convergencia	$0,125 \leq \Delta x : \Delta y \leq 8$
Número de Peclet de la celda	$Pe \leq 10$	Minimizar dispersión numérica debido a la discretización espacial	$Pe < 5$ en el área de la pluma
Número de Courant de la celda	$\Delta t <$ tiempo de viaje a través de la celda	Minimizar dispersión numérica debido a la discretización temporal	No es relevante en régimen permanente
Gradientes hidráulicos y de concentración	Celdas suficientemente finas cerca de zonas de bombeo, fuentes u otras zonas de grandes gradientes	Resolver gradientes relativamente bruscos	
Suavidad de la discretización	$0.5 \leq \Delta x_n : \Delta x_{n+1} \leq 2$	Minimizar problemas de convergencia	

Por otra parte, vale la pena también mencionar las recomendaciones de Holzbecher y Sorek (2005) como criterios de estabilidad para la modelación de aguas subterráneas:

Número de Peclet	$Pe = \frac{v \cdot \Delta x}{D} \leq 2$	
Número de Courant	$C = \frac{v \cdot \Delta t}{\Delta x} \leq 1$	(16)
Número de Neumann	$N = \frac{D \cdot \Delta t}{\Delta x} \leq \frac{1}{2}$	

En rigor, cada uno de estos criterios debe cumplirse, sin embargo, no es necesario calcularlos siempre, por ejemplo, el número de Peclet sólo tiene sentido en problemas de transporte, mientras que el número de Courant se utiliza cuando existe advección en el sistema.

A5

UTILIZACIÓN DE LAS CONDICIONES DE BORDE PARA EVALUACIÓN AMBIENTAL

En esta sección se exponen algunas recomendaciones de carácter general y otras más específicas para el uso de ciertas condiciones de borde en evaluaciones ambientales³.

Como recomendación general para todas aquellas condiciones de borde clasificadas en la Guía como “condiciones de borde calculadas por el modelo”, tanto la magnitud promedio del flujo a través de éstas obtenida con el modelo numérico, como su dirección y sentido, deben examinarse cuidadosamente a la luz del modelo conceptual y cotejarse con el balance hídrico preliminar del mismo. Por ejemplo, el modelo numérico puede ayudar a acotar mejor las conexiones subterráneas con otras cuencas, materializadas mediante pasos subterráneos asociados con bordes de altura conocida y de carga general, dentro del rango de escurrimiento estimado inicialmente en el modelo conceptual.

Otra recomendación general dice relación con las condiciones de borde catalogadas en la Guía como “condiciones de borde impuestas”, en las cuales se ingresa directamente el caudal, ya sea como lámina de agua (recarga superficial) o bien como volumen por unidad de tiempo (pozos de inyección y pozos de extracción). En este caso debe tenerse extremo cuidado en el ingreso de estas condiciones al modelo numérico, para que éste compute efectivamente el caudal que se requiere imponer, o al menos el balance de masas lo refleje. Para asegurar la consistencia se recomienda considerar criterios para verificar que no se hayan cometido errores en el ingreso de estas condiciones, por ejemplo graficando ambas situaciones (ver Figura 20 y 21 de la Guía).

Algunas recomendaciones más específicas se presentan a continuación:

Bordes de altura conocida: aunque esta condición de borde funciona bien durante el proceso de calibración de un modelo numérico, suele ocurrir que en posteriores simulaciones, ante un aumento de la explotación de aguas subterráneas y el consecuente descenso de la napa, esta condición puede transformarse en una fuente infinita de agua, lo que no necesariamente se condice con el modelo conceptual.

Existen dos casos que deben ser considerados para el análisis y utilización de esta condición de borde, de acuerdo a su funcionamiento:

- **Borde de recarga:** de acuerdo al modelo hidrogeológico conceptual existe otro cuerpo de agua conectado al acuífero (lago, otro acuífero, represa, etc.), que tiene una cota piezométrica mayor que el acuífero en la zona en que están en contacto. En este caso, el *borde de altura conocida* actúa como una fuente de recarga modulada por la conductividad hidráulica de la zona y el gradiente hidráulico. Naturalmente, en la medida en que el nivel del acuífero descienda, la recarga proveniente desde esta condición de borde aumentará de manera proporcional a dicho descenso. En ciertos casos, y hasta ciertos límites, esta situación puede ser realista, sin embargo se debe tener la precaución de que el aumento en la magnitud de esta recarga sea coherente con el modelo conceptual establecido. Lo anterior es especialmente sensible cuando esta condición se utiliza para modelar la conexión con otro acuífero o con una zona no modelada del mismo acuífero, ya que lo normal sería que los niveles del otro acuífero (no modelado) disminuyan de manera concomitante a los niveles del acuífero modelado, y de esta forma, el aumento en la recarga subterránea real puede ser muy inferior a la estimada con el modelo o incluso ser nula.
- **Borde de descarga:** de acuerdo al modelo hidrogeológico conceptual existe otro cuerpo de agua conectado al acuífero (lago, otro acuífero, represa, mar, etc.), que tiene una cota piezométrica menor que el acuífero en la zona en que están en contacto. En este caso, el *borde de altura conocida* actúa como una fuente de descarga, modulada por la conductividad hidráulica de la zona y el gradiente hidráulico. Para esta condición, el principal riesgo es que el descenso del nivel del acuífero provoque una inversión del gradiente hidráulico, esto es que el acuífero modelado pase a ubicarse a una cota piezométrica menor que el otro cuerpo de agua. Si esto ocurre, la condición de borde que de acuerdo al modelo conceptual debe actuar como una zona de descarga, comenzará a funcionar como una zona de recarga.

³ Las fuentes de información para esta sección se sustentan en una revisión de la literatura (manuales de usuario y publicaciones científicas) y en el criterio experto.

Debe hacerse presente que esta condición de borde nunca debería ser utilizada para representar el sistema ambiental sensible sobre el cual se está evaluando el impacto, como podría ser un lago, lagunas, humedales, vertientes, entre otras, del mismo modo que tampoco debería utilizarse en celdas cercanas al sistema ambiental sensible. En ambos casos el hecho de utilizar una condición de borde de este tipo implica que el modelo no calcula descensos en el nivel del acuífero o estos son despreciables, dado que la cota del agua subterránea en esas celdas se encuentra impuesta por el/la usuario/a. Del mismo modo, no debería utilizarse en celdas muy cercanas a las zonas de bombeo, porque se transforman en fuentes infinitas de agua y por tanto, el efecto general de extracciones sobre el acuífero podría subestimarse.

Arroyos o cauces superficiales que pueden ser afectados de manera significativa por el funcionamiento del acuífero: cuando el sistema ambiental sensible varía de manera considerable en su caudal o en su nivel, se debe utilizar una condición de borde que calcule las principales características del flujo en cauces abiertos, es decir, la condición de borde de arroyo. Esta condición de borde permite calcular el caudal que escurre realmente a través del río, así como otras condiciones del escurrimiento superficial como la altura del agua y el perímetro mojado. Esta condición resulta especialmente importante cuando se requiere calcular caudal ecológico.

Si bien es cierto que esta condición de borde entrega mayor información y con mayor precisión, requiere a su vez de una cantidad significativa de parámetros e información espacial (perfiles topobatómicos, rugosidad, caudales de ingreso o salida del cauce superficial), y adicionalmente, aumenta los tiempos de modelación y la probabilidad de tener dificultades para asegurar la convergencia. Por lo anterior, se recomienda utilizar esta condición sólo en aquellos casos en que sea realmente necesario. No se justifica su utilización en grandes ríos donde el nivel del acuífero no afectará de manera significativa su altura o caudal. En este caso se recomienda utilizar una condición de borde de río.

Salares, pajonales y vegas (evapotranspiración): presentan en general condiciones favorables para la manifestación de evapotranspiración, en especial en cuencas endorreicas de regiones áridas (por ejemplo, en el altiplano). En primer lugar, debe cuidarse en definir correctamente el área con potencial de evapotranspiración, adoptando como límites exteriores sus márgenes. Además, debido a que los acuíferos someros presentan una evapotranspiración mayor y a que ésta depende de la profundidad, resulta fundamental en el modelo contar con una representación adecuada de la superficie del terreno como techo del estrato superior. Por último, debe tenerse precaución en representar la curva de evapotranspiración mediante distintos segmentos rectos. Se debe evitar modelar la evapotranspiración mediante la aproximación de una única recta, ya que esto sobrestima en demasía su magnitud y se puede incurrir en errores significativos.

Vertientes alimentadas por agua subterránea: la condición de borde de altura conocida no debería ser utilizada para la representación de la cota del espejo de agua que se observa comúnmente al pie de este tipo de afloramiento. Modelaciones de este tipo no son recomendables desde una óptica ambiental, frente a la imposibilidad que la vertiente disminuya su caudal de descarga ante un aumento de la explotación subterránea del sistema. Una situación común y de gran relevancia ambiental corresponde al caso de manantiales de agua subterránea que alimentan lagunas en el borde de salares en cuencas endorreicas del altiplano. La condición de borde recomendada es la del tipo dren, con una altura de descarga correspondiente a la cota de terreno del alumbramiento. Esta condición permite la disminución del caudal de la vertiente como producto de la disminución del nivel de la napa, pudiendo llegar a ser nulo si los niveles del acuífero descienden por debajo de la cota del dren.

Lagunas en estrecha conexión con el acuífero: si se desea cuantificar el impacto de nuevas extracciones de aguas subterráneas, a través de captaciones artificiales, sobre el nivel de una laguna (u otro cuerpo de agua superficial), las condiciones de borde no debieran ser representadas a través de aquellas en las que se impone de algún modo el nivel del agua subterránea en las celdas (por ejemplo, altura conocida). En estos casos, resulta adecuado representar las lagunas a través de una condición de borde en la cual el modelo calcula el nivel del agua subterránea, como puede ser una condición de borde de lago. En caso de no utilizar una condición de borde especial, se puede utilizar un método denominado "Alto K" (*high K*) o bien no utilizar ninguna condición de borde en particular. Este último caso representaría la condición más desfavorable, lo que es consistente con lo señalado en el artículo 12 letra g del Reglamento del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental. En efecto,

cuando la superficie del terreno ha sido representada en forma apropiada en el modelo como techo del estrato superior, la sola profundización de los niveles de agua subterránea durante las simulaciones permite dar respuesta a la magnitud del impacto sobre el nivel de las lagunas, en la medida en que decrece la altura de la napa disponible sobre el nivel del suelo. Se trata del caso común de lagunas en la periferia de salares en cuencas endorreicas del altiplano.

Cauces naturales importantes que escurren en estrecha relación con el acuífero: la condición de borde tipo río es ampliamente utilizada para ríos o esteros principales que escurren en estrecha relación con el acuífero, como la mayoría de los cursos superficiales del norte chico que drenan los valles transversales. Esta condición tiene por objetivo estudiar la interacción río – acuífero, definida como el aumento de la infiltración desde el río y/o la disminución de afloramiento en el río, sin embargo no permite evaluar las propiedades del escurrimiento (para ello se debería utilizar la condición de borde arroyo). Se considera indispensable, antes de realizar simulaciones de carácter predictivo, que la calibración del modelo logre reflejar bien el comportamiento histórico del río y su relación con el acuífero, en cuanto a la magnitud promedio de los caudales de pérdida del río y recuperación del mismo, y los tramos donde se identifican. La condición de borde tipo río también puede ser usada en caso que el río no esté conectado con el acuífero y sólo actúe como fuente de recarga de una napa subterránea profunda (más de 20 m), con el cuidado de que se logre acotar esta infiltración dentro de las estimaciones preliminares (determinadas en el modelo conceptual) realizadas sobre la base de ensayos de infiltración o corrida de aforos en el río. La simpleza en el manejo de esta condición de borde, que se reduce en general a la imposición de una altura de agua promedio para cada tramo definido del río y su conductancia asociada, se traduce en que el riesgo de sobreestimar la infiltración sea significativo, más aún si los puntos de control del acuífero (pozos de observación) se encuentran lejos del río. La recomendación asociada a esta condición de borde consiste en aceptar su utilización siempre que se disponga de los estudios técnicos de respaldo adecuados (ensayos de infiltración, corrida de aforos, estudios previos de pérdidas y recuperaciones, entre otros).

ESTADÍSTICOS PARA EL ANÁLISIS CUANTITATIVO

Un análisis cuantitativo está compuesto por expresiones matemáticas y gráficas, donde se presentan los estadísticos residuales y errores entre los balances hídricos o concentraciones simulados y estimados.

A continuación se listan los principales indicadores utilizados para evaluar el ajuste de un modelo hidrogeológico, donde h_{obs} son las variables de estado observadas, h_{sim} son las variables de estado simuladas, h_{obs} y Δh_{obs} son, respectivamente, el promedio y rango de variación de las variables de estado observadas dentro del dominio de modelación, y W_i es un ponderador entre 0 y 1. Es importante señalar que, aunque se presenta h como variable de estado aludiendo a los niveles piezométricos, lo siguiente es válido en forma genérica para cualquier otra variable, en particular para las concentraciones del modelo de transporte.

Error residual: se define el error residual como la diferencia entre las variables simuladas y observadas.

$$E_r = h_{obs} - h_{sim} \quad (16)$$

Para analizar el máximo error residual se recomienda presentarlo en forma de histograma (ver Figura 11 de la Guía).

Suma de residuales:

$$\sum_{i=1}^n W_i \cdot |h_{obs,i} - h_{sim,i}| \quad (17)$$

Las ponderaciones se pueden aplicar a modo de privilegiar registros en los que se tenga mayor confianza, por lo tanto, esta ponderación es subjetiva.

Suma media de residuales:

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n W_i \cdot |h_{obs,i} - h_{sim,i}| \quad (18)$$

Es independiente de la cantidad de registros, pero depende del rango de los valores medidos. Este parámetro es poco comparable entre modelos, ya que cada acuífero tendrá rango de valores medidos diferentes. Cuando $W = 1$, corresponde al **error medio absoluto** (MAE por su sigla en inglés).

Raíz del error cuadrático medio (RMSE):

$$\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left[W_i \cdot (h_{obs,i} - h_{sim,i}) \right]^2} \quad (19)$$

Es una medida absoluta, sin embargo es dependiente del problema, es decir, depende del rango de los valores medidos. Es usualmente considerado como un buen parámetro si los errores están bien distribuidos normalmente.

A7**UBICACIÓN DE POZOS PARA EL PLAN DE SEGUIMIENTO AMBIENTAL**

A continuación se listan algunos criterios que deberían ser tomados en cuenta para definir la ubicación de los pozos de control del Plan de Seguimiento Ambiental y la frecuencia de monitoreo en éstos.

A7.1**POZOS DENTRO DEL ÁREA DE INFLUENCIA**

Es recomendable contar con un grupo de pozos dentro del área de influencia del proyecto, para lo cual se debería considerar, entre otros:

- Ubicar pozos en la zona donde se produce la acción que generará el impacto (por ejemplo, campo de pozos de bombeo).
- Ubicar pozos en la zona donde se produce el impacto, lo que permite verificar que los impactos reales sean iguales o menores a los evaluados.
- Ubicar pozos en la zona que transmite el impacto, lo que permite ver como avanza el impacto en términos temporales y espaciales, y eventualmente anticiparse a un impacto no previsto. Típicamente en proyectos donde se bombea agua subterránea, el modelo numérico puede ayudar a definir las direcciones principales de flujo, que permitirán diseñar transectas de pozos para seguir el avance del cono de depresión hacia el sistema que se quiere proteger.
- Construcción de nuevos pozos de control. Del mismo modo que el modelo permite optimizar la red de medición, también permite determinar dónde se debe densificar la red. Esto cobra mayor sentido en aquellas zonas donde el modelo indica que existirán impactos importantes y que no se cuenta con suficiente información, o bien en zonas donde se pueda afectar alguna variable que no se estaba monitoreando anteriormente. Por ejemplo, si producto de un proyecto que bombeará agua desde el acuífero se generará un impacto en el caudal pasante de un río, el PSA requerirá contar con estaciones fluviométricas en la zona donde se predice que ocurrirá la afectación.

A7.2**POZOS FUERA DEL ÁREA DE INFLUENCIA**

Resulta también de interés contar con pozos fuera del área de influencia del proyecto, para los cual se recomienda:

- Ubicar pozos en (o adyacente a) zonas sensibles de relevancia ambiental que se quieran proteger, de tal forma de seguir el comportamiento del sistema y controlar la ocurrencia y magnitud de perturbaciones (debidas al proyecto, a causas naturales o a terceros).
- Ubicar pozos en zonas de control. De acuerdo al modelo de funcionamiento conceptual también se requerirán pozos de control no relacionados con las actividades del proyecto, pero que permitan explicar efectos sobre la zona sensible debido a causas naturales o terceros. Por ejemplo, en el caso de una laguna que se abastezca de agua principalmente de las precipitaciones, el PSA debería incluir una estación meteorológica que permita explicar un descenso del nivel de la laguna no relacionada con el proyecto.





GUÍA PARA EL USO DE
MODELOS DE AGUAS SUBTERRÁNEAS EN EL SEIA

SERVICIO DE EVALUACIÓN AMBIENTAL
División de Evaluación Ambiental y Participación Ciudadana