

HIDROGEOLOGÍA DEL ACUÍFERO SUPERIOR DE LA FORMACIÓN CHUY (REGIÓN SUDESTE DEL URUGUAY) 2. Modelo Numérico

Almagro L.⁽¹⁾⁽⁴⁾, L. Vives⁽¹⁾, E. Custodio⁽¹⁾⁽³⁾ y L. Rocha⁽²⁾

(1) Dpto. Ingeniería del Terreno, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España.

(2) Obras Sanitarias del Estado. Montevideo - Uruguay.

(3) Actualmente en el Instituto Tecnológico Geominero de España. Madrid.

(4) Anteriormente en Obras Sanitarias del Estado. Montevideo, Uruguay.

RESUMEN

Dentro del estudio hidrogeológico del acuífero superior de la Formación Chuy, en la región sudeste del Departamento de Rocha, Uruguay (límite fronterizo con Brasil), se ha elaborado un modelo numérico con el propósito de simular el flujo de agua. En una serie de dos comunicaciones se describen los trabajos hidrogeológicos realizados en el área hasta el momento. Esta segunda comunicación corresponde a los trabajos de modelación numérica. Se presenta el proceso de construcción, calibración y análisis de sensibilidad del modelo, verificando su capacidad de reproducir en forma global la extensión espacial y la variación relativa de la superficie piezométrica, en coherencia con el modelo conceptual. El modelo numérico empleado permite tratar el problema inverso, es decir, estimar automáticamente los parámetros del sistema de forma que la respuesta del modelo (en términos de niveles y parámetros) se ajuste a los valores medidos. Así mismo esta metodología ha permitido analizar la incertidumbre de los distintos elementos del sistema. La recarga aparece como el parámetro más incierto.

ABSTRACT

As part of the hydrogeological study of the upper aquifer of Chuy Formation, in the Southeastern region of the Rocha Department, Uruguay (bordering Brazil), a numerical model has been constructed in order to simulate the groundwater flow. In a series of two papers the hydrogeological studies carried out up to now are described. This second paper deals with the numerical simulation. The process of model construction, calibration and sensibility analysis is presented, checking its ability to globally reproduce the spatial extension and relative change of the piezometric surface, in agreement with the conceptual model. The numerical model applied is able to consider the inverse problem, that is, automatically estimating the system parameters such as the model results (groundwater levels and parameters) agree with measured values. Also this methodology allows the analysis of the different system elements incertitude. Recharge appears as the most uncertain parameter.

1. INTRODUCCIÓN

Con el objetivo de verificar la coherencia del modelo hidrogeológico del acuífero superior de la Formación Chuy (Almagro et al, 1998) e identificar o determinar sus posibles incertidumbres, se ha modelado numéricamente el flujo subterráneo de esta formación. Así mismo se han generado las bases para elaborar una futura herramienta que permita considerar la respuesta del acuífero ante diferentes escenarios de gestión.

La zona modelada corresponde a un área de casi 400 km² que se desarrolla entre los bañados de San Miguel, la costa oceánica, el Arroyo Chuy y las sierras San Miguel y Santa Teresa (ver Figura 1).

El simular numéricamente el flujo del agua subterránea exige una exhaustiva revisión del modelo conceptual y de los datos utilizados en su elaboración, que no se alcanza en los tratamientos convencionales. Mediante la calibración automática, en la que se estiman los parámetros del modelo a partir de medidas sobre la respuesta del sistema e información convenientemente ponderada, se tiene en cuenta el ajuste entre los niveles medidos en el campo y los calculados por el programa, así como la plausibilidad de los parámetros calculados. Este proceso de calibración puede servir además para: (1) sugerir posibles modificaciones del modelo conceptual inicial, (2) invalidar un modelo conceptual y (3) sugerir modelos conceptuales alternativos no considerados en un principio.

La tarea ha permitido ajustar los valores inicialmente asignados al sistema y determinar las zonas y los datos o parámetros con mayor incertidumbre del modelo conceptual. Los resultados alcanzados son coherentes con el modelo conceptual propuesto, habiéndose obtenido un ajuste de niveles que puede considerarse aceptable. El valor medio de la desviación típica de los residuos es igual a 0.77 m, lo cual puede aceptarse como razonable para un primer ensayo en razón de la incertidumbre de los propios valores medios.

2. ESTRUCTURA DEL MODELO

En la estructuración del modelo se han considerado seis zonas de permeabilidad y recarga diferenciadas por las características litológicas del suelo y subsuelo y por el tipo de relieve topográfico.

La estructura monocapa del acuífero y la relación espacial entre el espesor y la extensión del mismo permiten considerar la dirección de flujo como esencialmente horizontal. Presenta un espesor saturado que alcanza los 24 m, adelgazándose hacia el oeste hasta desaparecer en las inmediaciones del bañado de Las Maravillas. Hidráulicamente el acuífero presenta un comportamiento libre en el centro de la Cuchilla de la Angostura y confinado hacia la zona de bañados. La conductividad hidráulica ha sido estimada a partir del análisis de 30 ensayos de bombeo. Se han tomado valores promedio comprendidos entre 1 y 10 m/día.

Como entrada de agua al sistema se ha considerado la recarga por infiltración del agua de lluvia, zonificada y distribuida espacialmente sobre la extensión del acuífero.

Las salidas del sistema son el Océano Atlántico, los arroyos Chuy, San Miguel y La Barrita, considerándose también la influencia de los canales de riego de la zona de bañados y Andreoni. En esta primera fase de simulación no se han incluido los bombeos ($1 \text{ hm}^3/\text{año}$) ni el consecuente descenso local de los niveles de agua. Se han considerado los niveles estáticos de los piezómetros y a dichos valores se ajustaron los niveles calculados. Los datos de niveles piezométricos que se han empleado corresponden a los de diciembre del 1995 (Almagro et al, 1988). Esto supone considerar que en la zona se ajusta una recarga neta (la real menos la extracción), aunque la zonificación realizada no permite suficiente detalle. No obstante se considera que los resultados son útiles en primera aproximación.

3. MODELO NUMÉRICO

La representación numérica del flujo del agua se ha realizado mediante el código TRANSIN_II (Medina et al, 1993). Este código resuelve las ecuaciones de flujo del agua subterránea y transporte de contaminantes, ambas en su forma lineal, por el método de los elementos finitos. El dominio del problema puede ser unidimensional y bidimensional, pero también se pueden formular modelos cuasi-tridimensionales (multicapa y radiales).

La ecuación de flujo planteada sigue la formulación clásica, admitiendo que la conductividad hidráulica pueda ser anisótropa. El problema puede formularse en régimen estacionario o transitorio, con condiciones iniciales definidas arbitrariamente por el usuario o planteadas como la solución de un estado estacionario. Las condiciones de contorno pueden ser de cualquiera de los tipos lineales: nivel fijo en un contorno, flujo a través de un contorno o expresar el flujo como una función lineal de los niveles. Tanto los niveles y caudales en los nudos como la recarga distribuida superficialmente, pueden variar en el tiempo.

TRANSIN_II tiene la excelente ventaja de permitir efectuar la calibración automática de los parámetros del sistema (permeabilidad, coeficiente de almacenamiento, recarga, coeficiente de goteo, caudal y nivel en los contornos del dominio), lo cual es conocido como método inverso. Esto se efectúa mediante un método estadístico en el que se maximiza la verosimilitud de los errores de estimación, es decir, las diferencias entre las estimaciones previas y los valores calculados (Carrera y Neuman, 1986).

El preproceso y postproceso de datos se realizó mediante el código INTRANSIN-III (Vives, 1994), el cual actúa de interfaz para distintos códigos gráficos y facilita las tareas necesarias para la modelación numérica del flujo y transporte.

3.1 Discretización espacial

La construcción de la malla de elementos finitos se realizó automáticamente mediante el código de generación de mallas denominado 2DUMG (Bugada, 1990), resultando un total de 573 nudos y 1035 elementos triangulares. En la Figura 2 se ha representado la malla. La discretización es más refinada en las zonas de mayor gradiente y de mayor densidad de datos, tales como la Ciudad del Chuy y de la Barra del Chuy, en la zona de la línea de costa y a lo largo de los arroyos Chuy, San Miguel y La Barrita.

El área en la cual aflora el basamento cristalino, al centro sur de la región simulada, se resolvió mediante su eliminación de la malla, considerándosela como un contorno de flujo nulo.

La malla básica se ha modificado en el contorno a lo largo de la línea de costa para simular, mediante un artificio numérico, la diferencia de niveles entre el acuífero (8 m) y el nivel fijo del océano (0 m), colocando elementos unidimensionales que conectan los nudos de ese contorno con otros nudos que representan el nivel del mar. Con ello se pretende considerar la existencia de una posible superficie de rezume. De esta forma la malla original es aumentada a 600 nudos y 1062 elementos (entre unidimensionales y triangulares).

3.2 Zonificación y estimación previa de los parámetros

En este contexto es importante destacar que TRANSIN_II permite asignar a un conjunto de elementos o nudos de la malla propiedades similares, zonificando de esta manera los valores constantes de los parámetros del sistema, como por ejemplo agrupar todos los elementos que componen una parte del dominio con una misma litología. El parámetro asociado a cada una de estas zonas es el resultado de multiplicar un coeficiente que depende del elemento (o nudo) por un parámetro característico de la zona a la que pertenece el elemento (o nudo). En el caso de parámetros que varían con el tiempo (p. ej., recarga superficial) el resultado anterior se multiplica por una función de tiempo. El programa estima automáticamente los parámetros de zonas a partir de una estimación previa.

La secuencia metodológica para la modelación del Chuy, de acuerdo con el tratamiento de los parámetros, consistió en definir los límites o geometrías de las zonas, los coeficientes de los elementos (o nudos) y los parámetros de cada una de las zonas. Todo ello se especificó para los siguientes parámetros: permeabilidad, recarga superficial, caudal fijo, nivel fijo o externo en el contorno y coeficiente de goteo en los cauces de los arroyos.

La permeabilidad se zonificó en seis zonas, las cuales han sido representadas en la Figura 3. Las cuatro subdivisiones más importantes corresponden al área de bañados de Las Maravillas y San Miguel, al de la Cuchilla de La Angostura y al del bañado de La Barrita. La geometría de estas zonas se corresponden con regiones de características geológicas similares, tanto del estrato permeable como de su base y cobertura.

Existen dos zonas especiales con permeabilidades ficticias, empleadas para reproducir la pérdida de carga a lo largo de la línea de costa (por medio de las barrancas) y en el borde este de la zona de bañados de La Barrita (zona 5), en cuya descripción no se insistirá, ya que su justificación es un mero artificio numérico, para considerar la posible divisoria del acuífero en dos en esa zona.

El coeficiente del elemento empleado para la permeabilidad es el espesor saturado medio, relativo a la piezometría realizada en diciembre de 1995 y al fondo del acuífero. La estimación previa se realizó en función del análisis de 30 ensayos de bombeo distribuidos principalmente en la Ciudad del Chuy y en la Barra del Chuy. La permeabilidad varía entre 1 y 10 m/día.

La recarga se dividió en cuatro zonas coincidentes con las principales zonas de permeabilidad (ver Figura 3). La estimación de la recarga superficial máxima en la zona simulada esta acotada superficialmente por la diferencia de la precipitación, que varía en un entorno de 1000 mm/año, y la evaporación libre más evapotranspiración, cuyo valor se estima de 900 mm/año. Los valores orientativos medios proceden de un balance previo de cloruros entre la precipitación y la recarga. Hay que tener en cuenta que en la zona de la Ciudad del Chuy la recarga es una recarga neta como se había dicho.

Como condición de contorno se han considerado dos tipos: nivel fijo (Dirichlet) y condición mixta (Cauchy). Esta última condición considera que el caudal por unidad de superficie de entrada o salida (q) esta gobernado por la expresión $q=\alpha(h_e-h)$, siendo h el nivel en el acuífero, h_e el nivel externo y α el coeficiente de goteo, que representa la resistencia hidráulica al flujo entre el agua libre en superficie y el acuífero (dimensiones de tiempo⁻¹), que es el cociente entre la permeabilidad vertical y el espesor.

Las condiciones de contorno en los límites de la zona de estudio (Figura 4) son: nivel fijo al este y coincidente con el nivel del mar; al noroeste la sierra San Miguel y al sur y sudoeste la Sierra Potrero Grande constituyen bordes impermeables; al norte las líneas de flujo de agua (paralelas a dicho límite) permite considerar el límite imaginario de la frontera con Brasil también como un borde de caudal nulo; al oeste de la región y coincidente con la isopaca cero del acuífero se ha escogido, como artilugio numérico, una condición mixta con un factor de goteo muy grande, imponiendo de este modo que se mantenga el nivel estimado (6 m) y que el caudal de salida de agua por dicho contorno sea mínimo; y finalmente, al noreste se tiene al Arroyo Chuy como condición mixta.

En el interior de la zona modelada se han considerado como condición de contorno mixto los arroyos Chuy, La Barrita y San Miguel, el canal de riego paralelo a la ruta 9 y el canal de riego E-O. Como nivel exterior h_e para estos arroyos se ha tomado el del espejo de agua nivelado en diversos puntos de dichos cursos. En el caso de los Arroyo Chuy y La Barrita la piezometría indica que estos cursos presentan un comportamiento efluente o drenante del acuífero ($h>h_e$). En el Arroyo San Miguel la diferencia de niveles entre el curso de agua y la superficie piezométrica es menor a 0,11 m, por lo que las oscilaciones naturales de ambas superficies enmascara la relación entre ambas, la cual posiblemente es cambiante según la época.

En total se consideraron seis zonas de goteo, a cinco de las cuales se les ha asignado un valor del producto del parámetro alfa por el espesor acuitardo de 0.5 m/día. Estas seis zonas corresponden al Arroyo Chuy, al Arroyo La Barrita, al Arroyo San Miguel, al canal paralelo a la ruta 9 y al que desemboca en el Arroyo San Miguel.

Los niveles externos asignados en los cursos de agua se han obtenido de un plano de topográfico a escala 1:50.000. Esto puede ser una fuente de error, y más aún cuando los cursos están encajonados como es el caso del Aº Chuy y de los canales de riego.

3.3 Datos empleados para la calibración

Durante el proceso de estimación automática de los parámetros, o lo que es lo mismo para la solución del problema inverso, el programa TRANSIN_II minimiza una función objetivo que depende de las diferencias ponderadas entre los valores medidos (niveles, concentraciones y parámetros) y los calculados por el programa. Los parámetros óptimos son aquellos que minimizan la función objetivo. De esta forma se asegura que el modelo reproduce la respuesta observada del acuífero y que además los parámetros estimados son coherentes con la información previa sobre los mismos.

Los niveles medidos en una serie de puntos son parte de los datos que requiere el programa. Estos puntos son los "puntos de observación", que coinciden con los pozos que disponen de medidas. El número de puntos de observación que se emplearon en este modelo es de 37. La Tabla 1 contiene un listado de los puntos de observación con sus coordenadas y los niveles observados. En la Figura 5 se puede ver la distribución espacial de los mismos.

Los coeficientes de ponderación de los datos de nivel son las inversas de las desviaciones típicas que miden su fiabilidad. Durante la fase de calibración del modelo de flujo se asignó una desviación típica de 1 m a los puntos de observación. Posteriormente se asignaron mayores desviaciones típicas (de 3 a 7 m) a los pozos cuyos datos podían contener errores de medición, errores de nivelación y a aquellos que se supone que pueden estar influenciados por bombeos no controlados.

4. CALIBRACIÓN

Una vez definido el modelo conceptual de flujo, el proceso de calibración consiste en estimar los parámetros del modelo de forma que la respuesta del mismo en términos de niveles se ajuste a los valores medidos. Al mismo tiempo los valores estimados de los parámetros deben ser coherentes con sus estimaciones previas y con el conjunto del modelo conceptual.

La estrategia de calibración no preveía estimar simultáneamente todos los parámetros del modelo, porque la solución no es única para este tipo de problema. Se calibraron todas las zonas de conductividad, la recarga en la zona de la Cuchilla de la Angostura y el parámetro de nivel fijo referente al canal de riego de sentido N – S, paralelo y al oeste de la Ruta 9. Este proceso permitió modificar el modelo conceptual de acuerdo con el análisis de los resultados, robusteciendo el esquema del comportamiento del acuífero al acotar algunas de las incertidumbres iniciales del mismo.

5. RESULTADOS DEL MODELO

A continuación se presentan los resultados obtenidos, cuyo ajuste puede ser considerado como aceptable, pero existen una serie de aspectos no representados adecuadamente que serán mas adelante el objeto de un estudio de mayor detalle, como por ejemplo la recarga, nivelación, aforos de los arroyos, etc.

Se ha obtenido una desviación típica media de los residuos de 0.77 m. Se debe tener en cuenta que este valor está influenciado por los puntos de observación situados en las zonas con poca información (mayor incertidumbre), por ejemplo al sur de la ruta que accede a la Barra del Chuy y franja costera. También influye en el valor de la desviación al no haberse considerado las extracciones. En la región de la Ciudad del Chuy donde se ha obtenido una buena resolución del modelo geológico y el volumen de información es suficiente, la desviación típica es menor a 0.16 m. En la Figura 6 se comparan los niveles medidos y los calculados por el programa, donde se debe tener presente que los puntos de observación P12, P24, P25, P47, P49 y P55 tienen menor peso por tener un valor medido de baja credibilidad. En ella, dejando de lado los pozos con peso, se puede observar como los puntos quedan situados cerca de la línea imaginaria de 45 grados.

La Figura 7 contiene los errores obtenidos en cada uno de los puntos de observación, entendiendo como error, la diferencia entre el valor piezométrico medido y el calculado por el programa. Es decir, si el error es positivo el nivel medido es superior al calculado y si es negativo el nivel calculado supera al medido. También se ha observado que en las zonas cercanas a los cursos de agua se obtiene un error mayor como resultado de la incertidumbre en la asignación de las cotas de sus lechos.

La Figura 8 contiene la piezometría calculada por el programa junto con las medidas observadas en los distintos puntos de observación. En ella se puede observar como se reproduce cualitativamente las formas de las isopiezas de la campaña de 1995 (Almagro et al, 1998). También se puede observar como el flujo subterráneo está influenciado por los arroyos interiores, la línea de costa y las recargas. Paralelo a la línea de costa se observa una compresión de las isopiezas debido a cambios litológicos y a la existencia de las barrancas litorales.

En la Tabla 2 se han representado los valores de todos los parámetros inicialmente estimados y los resultantes de la calibración. De dicha comparación se desprende el grado de fiabilidad del modelo numérico. Se ha estimado un conjunto de ocho parámetros: todas las zonas de permeabilidad, la recarga en la zona de la Cuchilla de La Angostura y el nivel del contorno oeste. El análisis de las pasadas previas condujo a estimar este conjunto de parámetros y a reducir el valor del nivel de agua libre en el Arroyo del Chuy.

Los parámetros calculados son en general coherentes con el modelo conceptual propuesto y con las estimaciones previas, a excepción de la recarga. Los valores de permeabilidad estimados inicialmente no difieren de los calculados por el programa (0.8 a 8.5 m/día), están dentro del mismo orden de magnitud y además mantienen la relación entre las distintas zonas (en cuanto a que una zona sea más o menos permeable que otra).

Los valores medios de recarga estimados varían entre un mínimo de 1 mm/año (zona 4) y un máximo de 24 mm/año (zona 1). Estos valores se deberán contrastar con otras técnicas de medición o de estimación para reducir su incertidumbre.

La Figura 9 presenta el balance estacionario de entradas y salidas del modelo. Se puede observar que todas las salidas del sistema se realizan a través de los arroyos, canales y descarga hacia el mar. El volumen que se recarga por la precipitación

menos la extracción por bombeo es de 4.34 hm³/año, la descarga al mar es de 1.75 hm³/año y el caudal base de los arroyos mas canales de riego y drenaje es de 2.59 hm³/año. Todos estos valores son coherentes con el modelo conceptual.

El modelo presenta una considerable sensibilidad a la variación de la recarga, niveles externos y en menor grado a la conductividad hidráulica. Esto se destaca en la zona de bañados donde la evaporación y la lámina de agua superficial condicionan fuertemente la recarga y consecuentemente los niveles piezométricos.

CONCLUSIONES

Se ha presentado en detalle la simulación numérica preliminar del flujo de agua en régimen estacionario del acuífero superior de la Formación Chuy. El resultado del modelo final ha resultado cualitativamente coherente con el modelo conceptual sobre el cual se ha elaborado, y el ajuste de los niveles puede considerarse aceptable. Esto proporciona robustez a la interpretación geológica e hidráulica realizada en función de los datos litológicos y de niveles.

El análisis de los resultados de la modelación ha permitido determinar las zonas del modelo conceptual con mayor incertidumbre y precisar el grado de confiabilidad de los diversos datos utilizados.

Se han generado las bases para definir los elementos del sistema en los que se debe profundizar el conocimiento, para simular el régimen de flujo transitorio y para realizar predicciones de diversos escenarios de gestión del acuífero.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a las instituciones uruguayas Obras Sanitarias del Estado, Facultad de Agronomía y al Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria el apoyo brindado en la provisión y elaboración de los datos con los cuales fue posible realizar este artículo. También a las instituciones españolas Universidad Politécnica de Cataluña y al Instituto Tecnológico Geominero de España por su apoyo logístico.

BIBLIOGRAFÍA

Almagro, L., Custodio, E., Rocha, L., Abelenda, D., (1998). "Hidrogeología del acuífero superior de la Formación Chuy (región sudeste del Uruguay). 1. Modelo Conceptual" IV Congreso Latinoamericano de Hidrología Subterránea. Montevideo – Uruguay.

Bugeda, G. (1990). "Utilización de técnicas de estimación de error y generación automática de mallas en procesos de optimización estructural". Tesis Doctoral, Escuela Técnica Superior de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona. Universidad Politécnica de Cataluña.

Carrera, J., Neuman, S., (1986). "Estimation of aquifer parameters under transient and steady state conditions, I, Maximum likelihood method incorporating prior information". *Water Resour. Res.*, 22(2), 199-210.

Haitjema H. M. (1995). "Analytic element modeling of groundwater flow". Academic Press, INC. California, USA.

Medina, A., G. Galarza, J. Carrera, (1993). "Manual del programa TRANSIN-II". Escuela Técnica Superior de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona.

Spitz, K., J. Moreno (1996). "A practical guide to groundwater and solute transport modeling". Wiley-Interscience, N.Y., USA.

Vives, L. (1994). "Manual del código INTRANSIN III, Versión 2.0". Escuela Técnica Superior de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona. Informe interno.

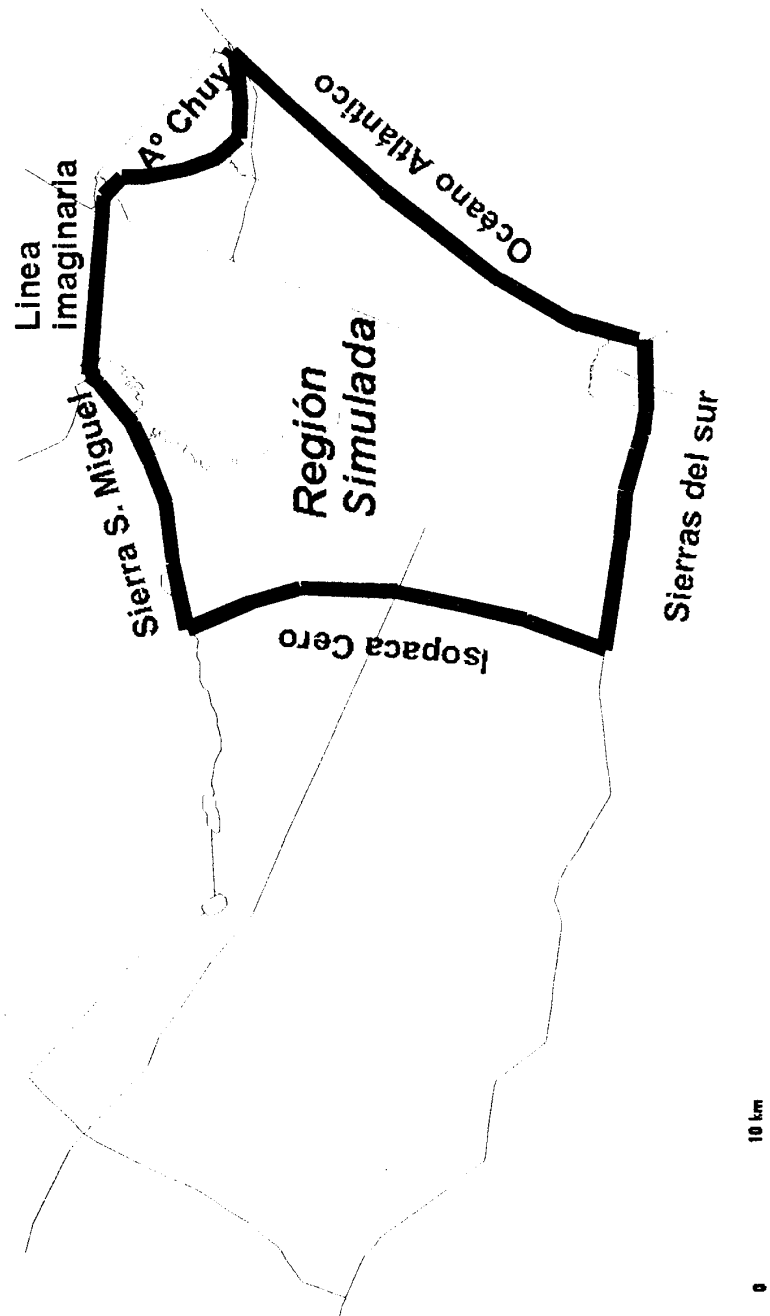


Figura 1. Zona modelada.

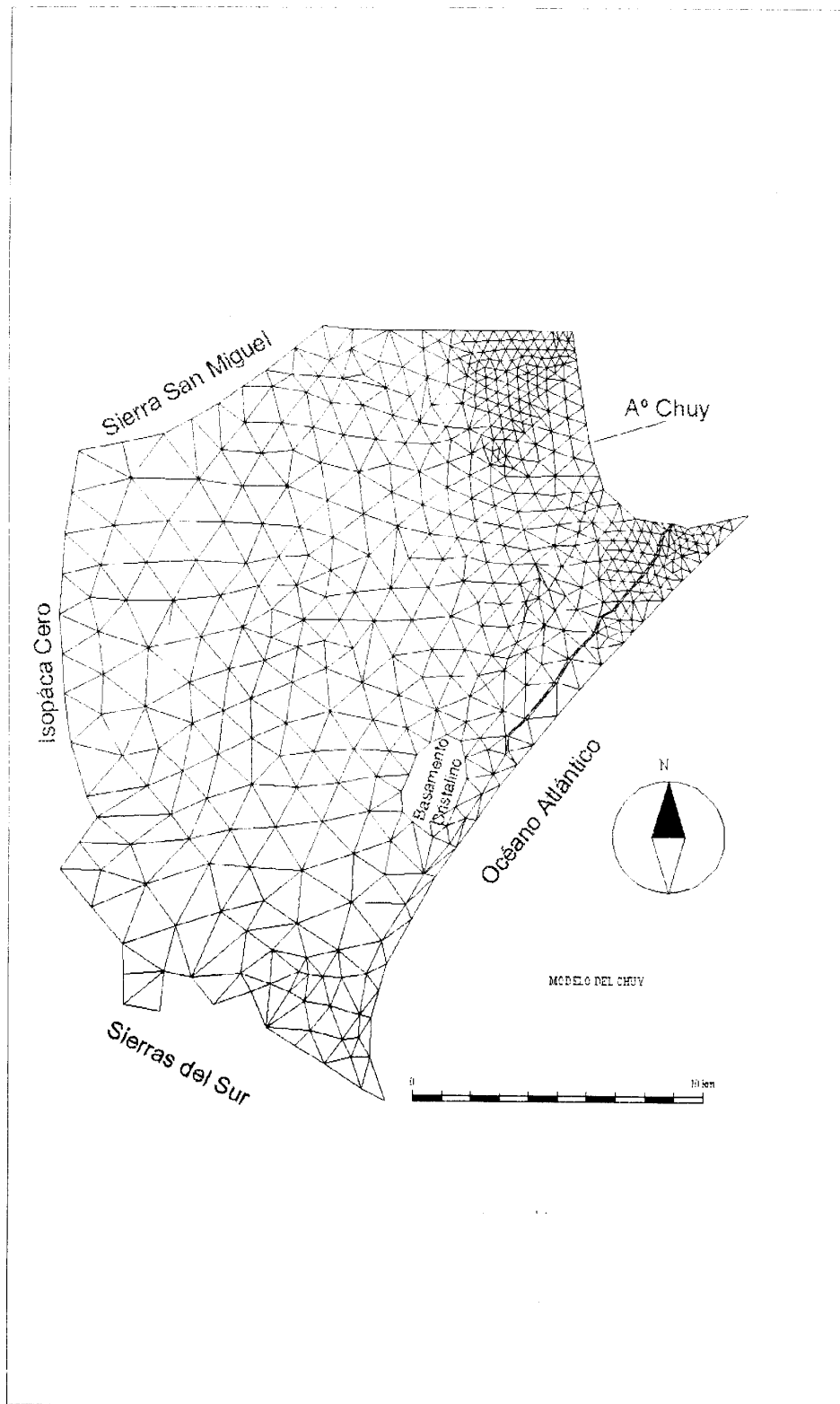


Figura 2. Malla de elementos finitos utilizada en la modelación. La malla tiene 600 nudos y 1062 elementos (1035 triangulares y 27 unidimensionales).

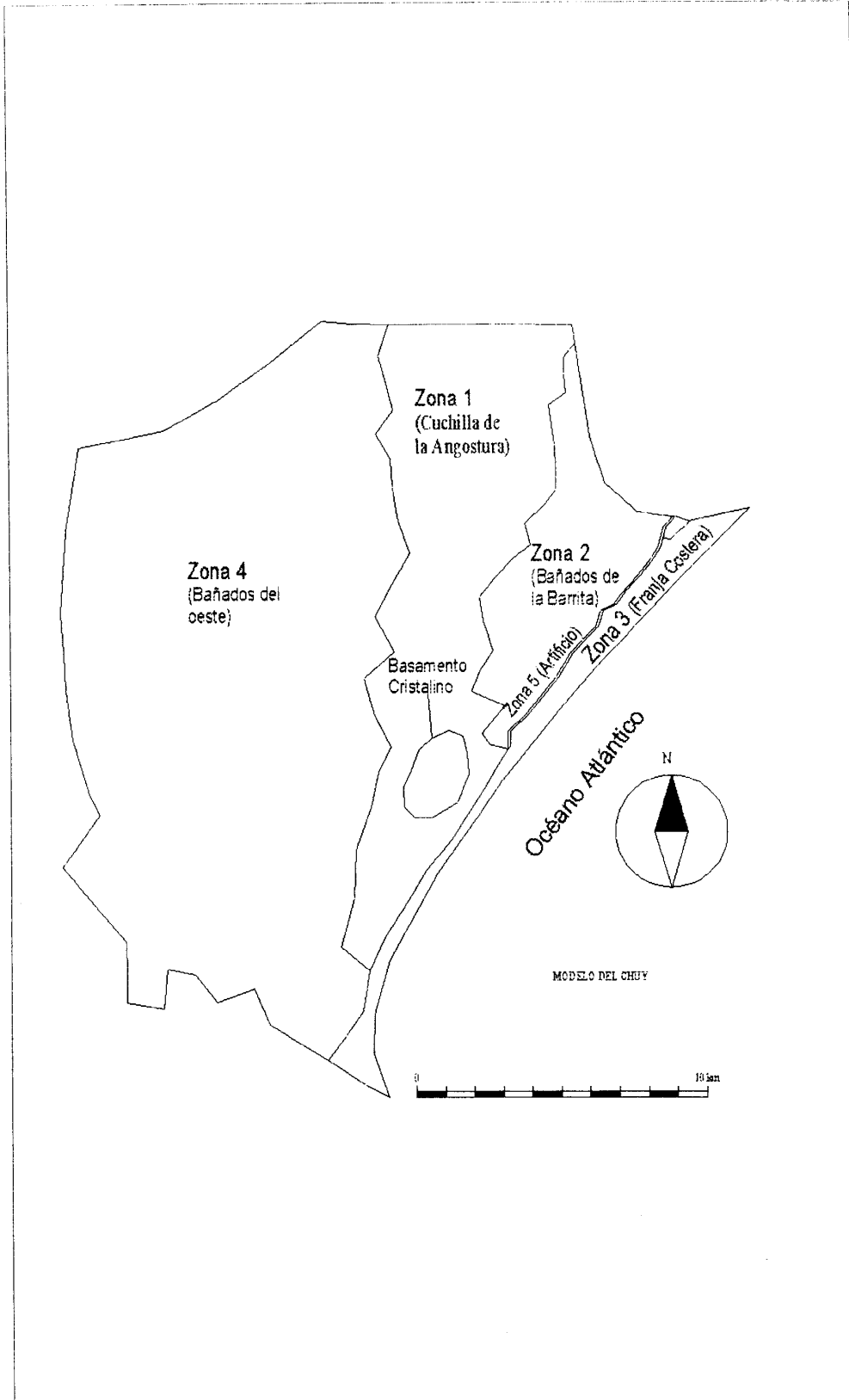


Figura 3. Zonas de permeabilidad y de recarga (se mantiene la misma numeración para ambas zonificaciones).

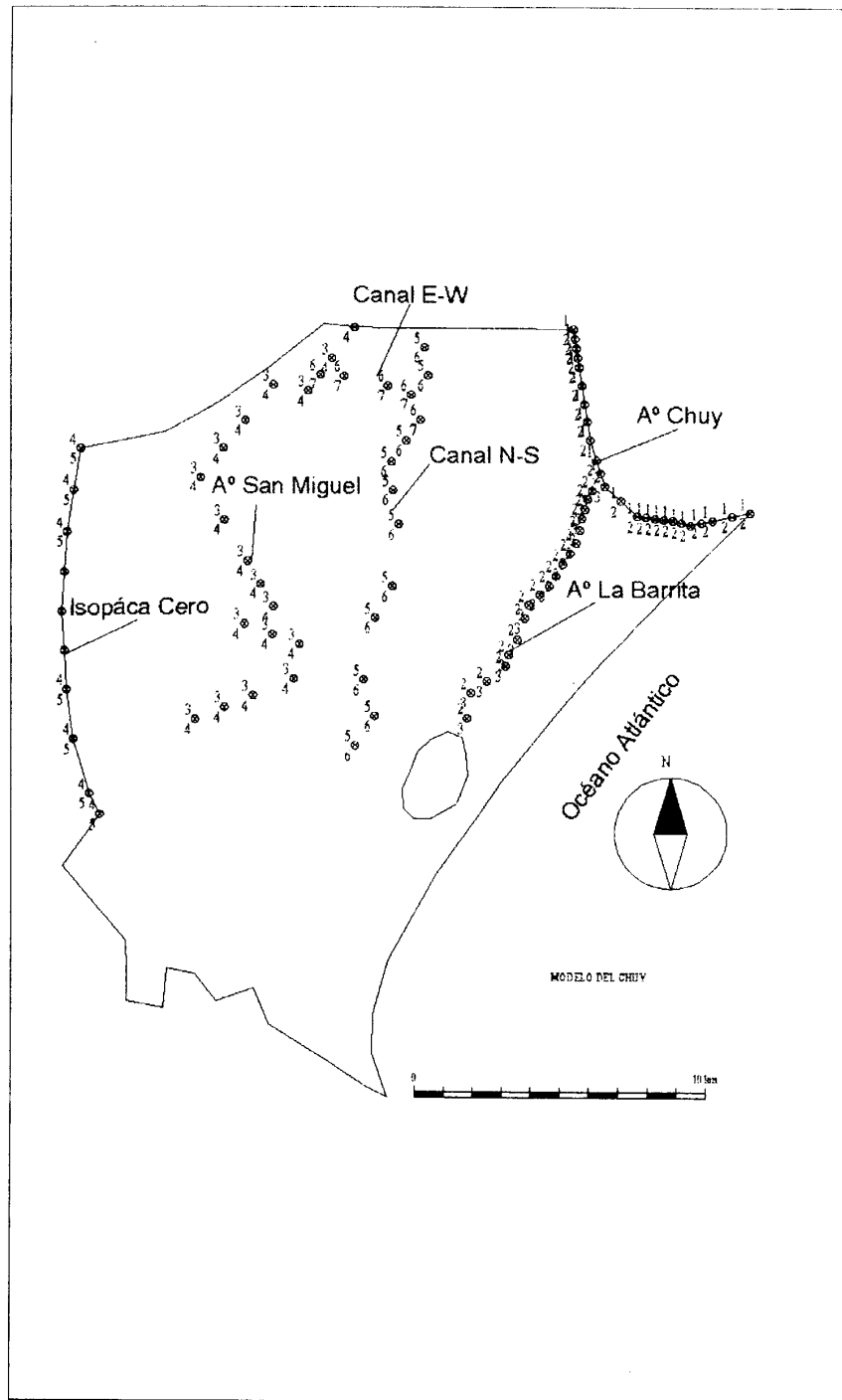


Figura 4. Condiciones de contorno del modelo. Consta de una zona de nivel fijo (contorno este, el mar) y seis zonas de goteo a lo largo de los cursos o contornos de agua superficial (todas ellas con una zona de nivel externo asociada). Los números situados por encima de cada nudo de la malla es la zona de goteo y los que quedan por debajo son las zonas de niveles externo.

Tabla 1. Puntos de observación empleados en la calibración. El nivel medido y las coordenadas UTM están en metros. En la Figura 5 se puede observar su distribución espacial.

Denominación en el modelo	Origen del punto OSE*	Nivel Medido (m)	Desviación Típica (m)
P1	663/1	5.12	1
P10	69.1.016	5.87	1
P11	69.1.027A	2.95	1
P12	69.1.019	1.62	7
P13	69.1.022	6.46	1
P14	69.1.025	5.44	1
P15	69.1.028	5.52	1
P17	Prueba 2	6.05	1
P18	Prueba 3	5.91	1
P19	Prueba 4	7.7	1
P2	Prueba 1	6.92	1
P24	1257	0.65	7
P25	69.1.022	3.44	7
P27	69.1.008	8.21	1
P28	69.1.018	7.79	1
P29	69.1.024	4.75	1
P3	1338	5.1	1
P30	69.1.026	2.64	1
P4	69.1.003	6.17	1
P42	Ojos de Agua	8.15	1
P43	La Horqueta	8.22	1
P44	El Piquete	7.75	1
P46	Doña Marieta	8.17	1
P5	69.1.004	6.51	1
P51	Cateo 1	5.84	1
P53	Cateo 3	4.11	1
P54	Cateo 4	4.71	1
P55	Cateo 5	6.47	3
P58	Cateo 8	5.56	1
P59	Cateo 9	3.93	1
P6	69.1.010A	5.38	1
P7	69.1.011	5.12	1
P8	69.1.012	5.6	1
P9	69.1.013	6.17	1
P49	Camping 3	0	7
P66	69.1.032	2.6	1
P47	El Piquete	1.84	7

OSE*, Obras Sanitarias del Estado, República Oriental del Uruguay.

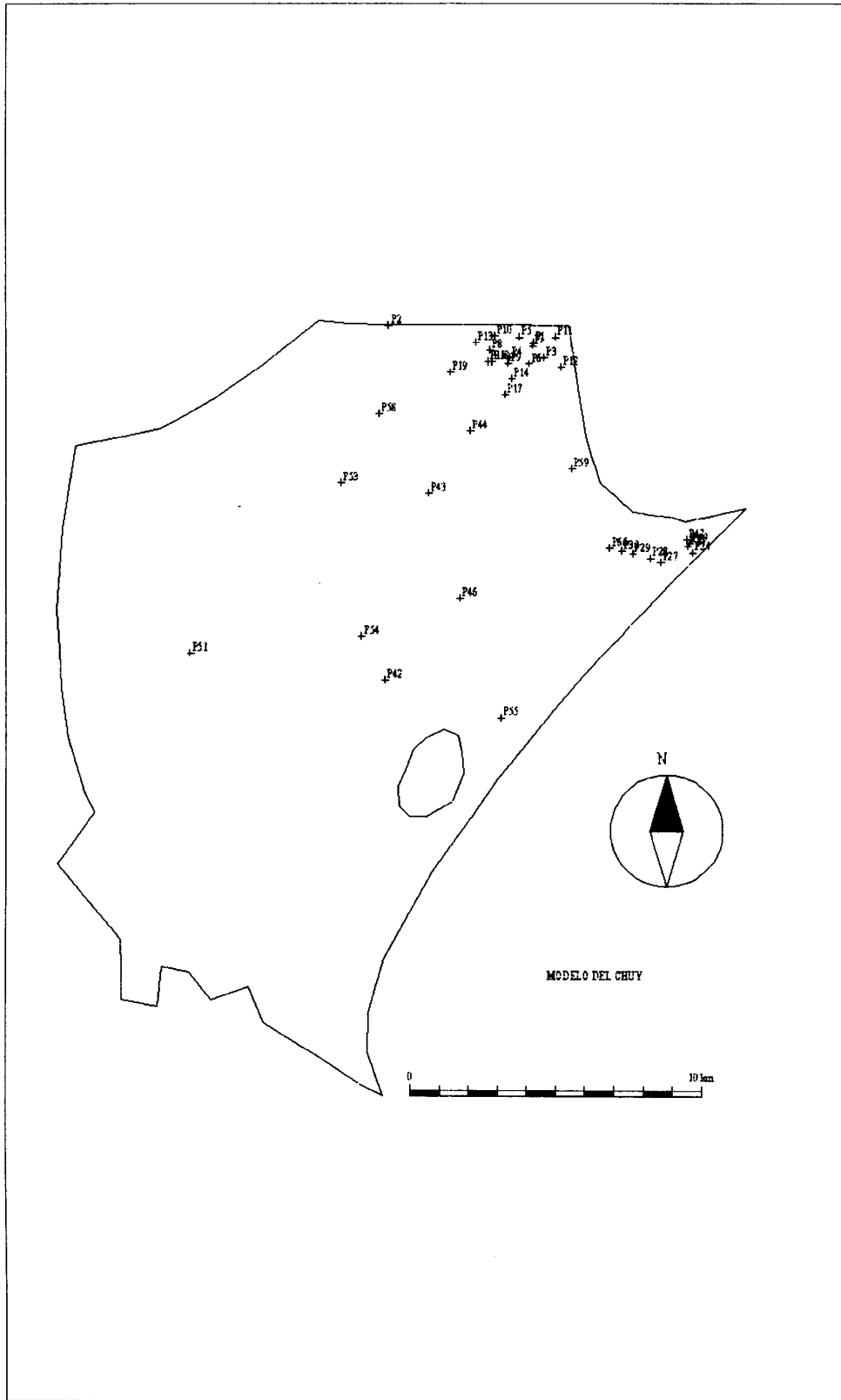


Figura 5. Situación de los puntos de observación empleados en la etapa de calibración del modelo.

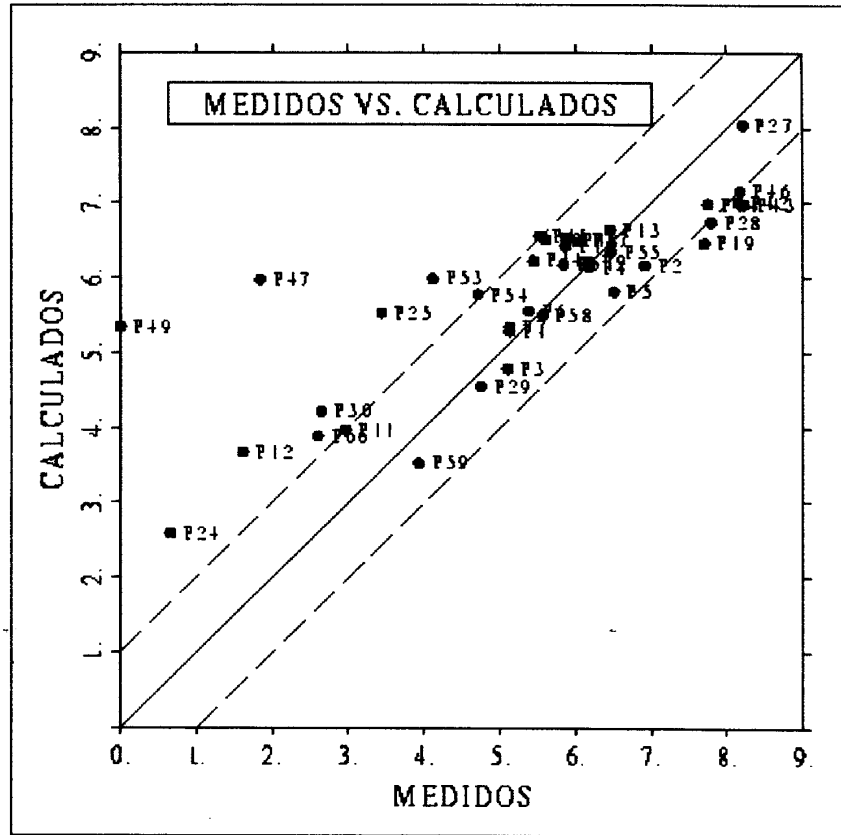


Figura 6. Niveles piezométricos medidos y calculados (en metros). Los puntos de observación P12, P24, P25, P47, P49 y P55 que quedan fuera de la zona de confianza, tienen un peso elevado por tener un valor medido de baja credibilidad.

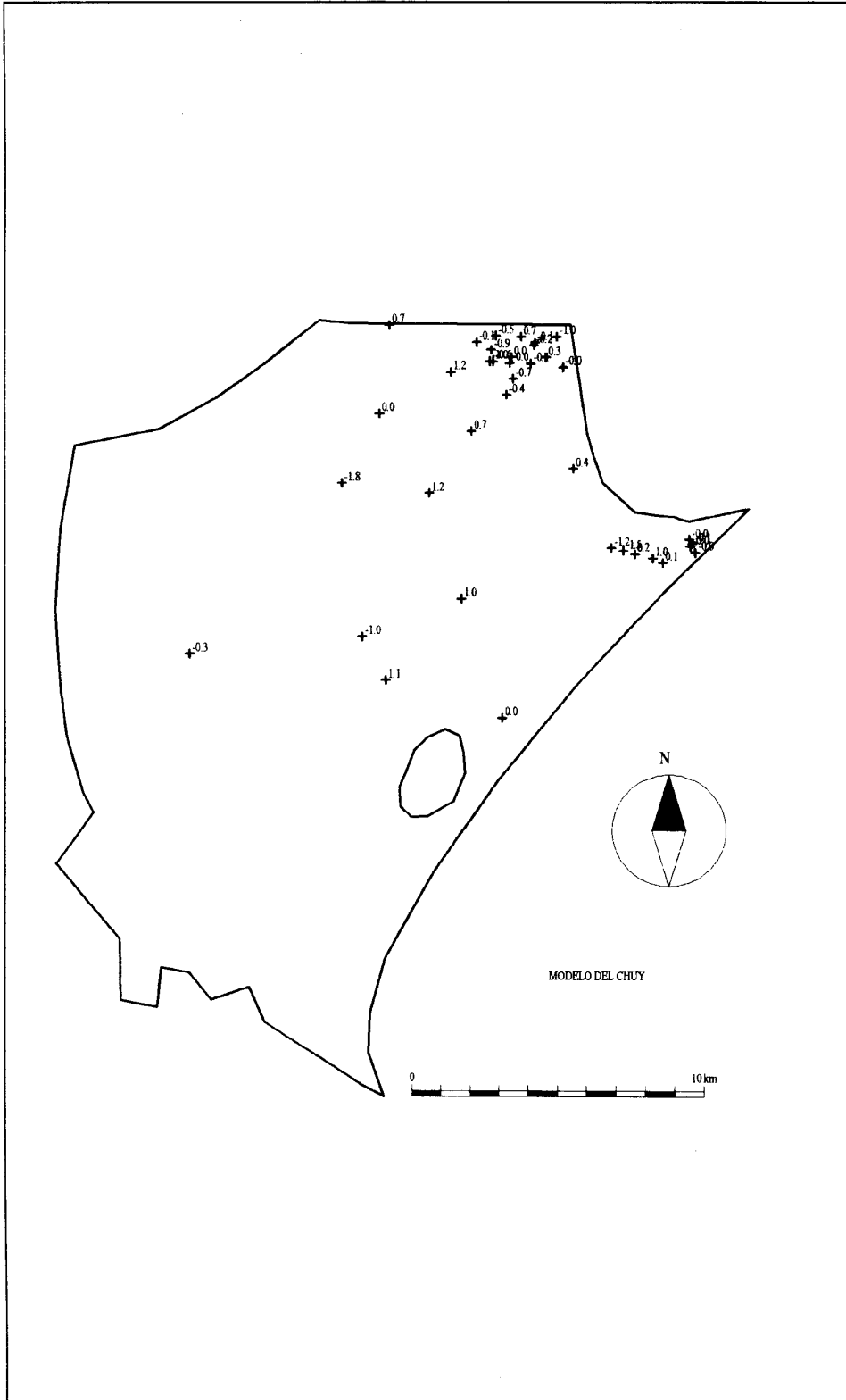


Figura 7. Mapa de errores; diferencia entre los niveles medidos y los calculados por el programa (en metros). Si el valor es positivo el nivel medido es superior al calculado y si es negativo el nivel calculado supera al medido.

Tabla 2. Lista de parámetros: tipo de parámetro, denominación, valor inicial o estimación previa y valores estimados durante la calibración del modelo. El valor de la zona 6 de permeabilidad (Barranca de la costa) y de la zona 4 de coeficiente de goteo (límite oeste) son ficticios, es decir no tienen un significado físico, pero si permiten reproducir el comportamiento del sistema en esos contornos.

Parámetros	Denominación	Número de Zona	Estimación Previa	Valor Calculado	Variable a estimar	Desviación Típica *
Permeabilidad (m/día)	Cuchilla de la Angostura	1	10	7.418	Si	1
	Bañados de La Barrita	2	1	8.38	Si	1
	Franja costera	3	5	1.107	Si	1
	Bañados del Oeste	4	1	2.805	Si	1
	Contacto	5	5	0.7844	Si	1
Recarga (mm/año)	Cuchilla de la Angostura	1	11	24	Si	1
	Bañados de La Barrita	2	7	7	No	
	Franja costera	3	90	8	Si	
	Bañados del Oeste	4	2	2	No	
Nivel Fijo (m) s.n.m.	Océano Atlántico	1	0	0	No	
	Arroyo Chuy	2	0.9	0.9	No	
	A° La Barrita	3	1	1	No	
	A° San Miguel	4	1	1	No	
	Límite oeste	5	6	6	No	
	Canal de riego N-S	6	1	1.152	Si	1
	Canal de riego E-O	7	1	1	No	
Coeficiente de goteo (m/día)	Arroyo Chuy	1	0.5	0.5	No	
	A° La Barrita	2	0.5	0.5	No	
	A° San Miguel	3	0.5	0.5	No	
	Límite oeste	4	10	10	No	
	Canal de riego N-S	5	0.5	0.5	No	
	Canal de riego E-O	6	0.5	0.5	No	

*La desviación típica tiene las mismas unidades que el parámetros.

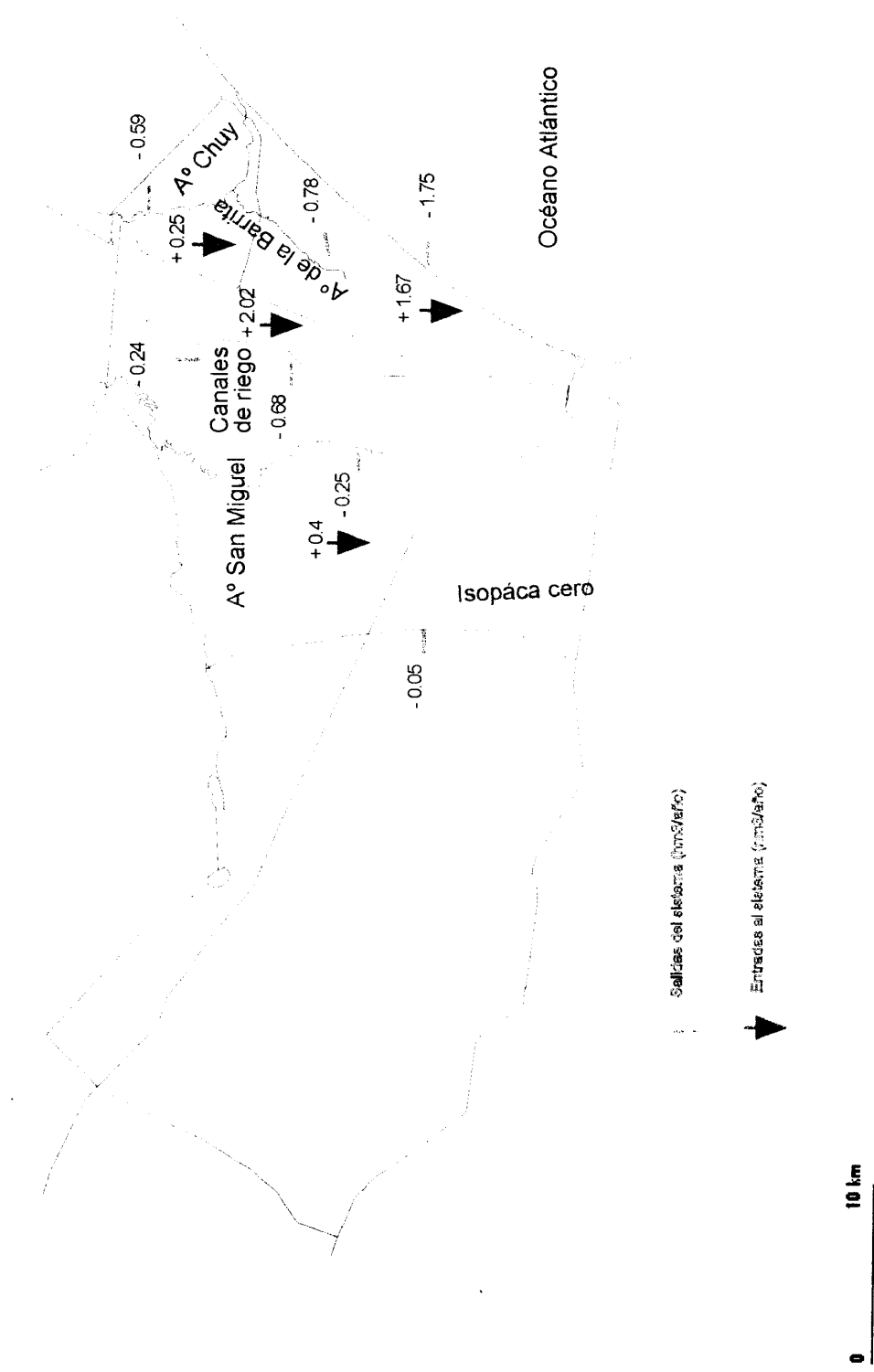


Figura 9. Balance de masas (en $\text{hm}^3/\text{año}$).