



DIRECCION NACIONAL DE MEDIO AMBIENTE
MINISTERIO DE VIVIENDA, ORDENAMIENTO TERRITORIAL Y MEDIO
AMBIENTE



FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE LA
REPUBLICA



INSTITUTO DE MECANICA DE
LOS FLUIDOS E INGENIERIA



MEMORIA

FEBRERO 2000

AUTORIDADES

MINISTERIO DE VIVIENDA ORDENAMIENTO TERRITORIAL
Y MEDIO AMBIENTE
MVOTMA

CRA. BEATRIZ MARTÍNEZ
MINISTRA

Arq. FERNANDO MAGNOU
SUBSECRETARIO

Dra. SYLVIA USHER BORRAZ
DIRECTORA GENERAL DE SECRETARIA

Ing. Quim. LUIS SANTOS MICHETTI
DIRECTOR NACIONAL DE MEDIO AMBIENTE

UNIVERSIDAD DE LA REPUBLICA

Dr. Ing. RAFAEL GUARGA
RECTOR

Ing. MARIA SIMON
DECANO DE LA FACULTAD DE INGENIERIA

**CARTA DE VULNERABILIDAD DEL ACUIFERO RAIGON
ESCALA 1:100.000**

Dirección:

JORGE DE LOS SANTOS

Equipo de Trabajo:

CLAUDIA BESSOUAT
GRISELDA CASTAGNINO
ALEJANDRO OLEAGA
MARIANA ROBANO
SERGIO DE SOUZA
ALBERTO MANGANELLI
HUGO PERDOMO

Contraparte Técnica:

MARISOL MALLO
FERNANDO PACHECO
DANIEL VIGNALE

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	4
ÁREA DE ESTUDIO.....	5
CONCEPTOS BÁSICOS	5
METODOLOGÍA.....	7
OBTENCIÓN DE DATOS	8
ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS.....	9
PROFUNDIDAD.....	9
RECARGA	9
TIPO DE ACUÍFERO.....	10
SUELO.....	10
TOPOGRAFÍA	11
IMPACTO DE LA ZONA VADOSA	12
CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA	12
CARTA DE VULNERABILIDAD DEL ACUÍFERO RAIGÓN	13
COMENTARIOS FINALES	13
AGRADECIMIENTOS	14
BIBLIOGRAFÍA	14
FIGURAS	17

INTRODUCCION

La Dirección Nacional de Medio Ambiente (DINAMA) y el Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental (IMFIA) acordaron la realización de un Convenio Interinstitucional que tuvo como propósito principal confeccionar la Carta de Vulnerabilidad del Acuífero Raigón. Con la información recogida y procesada hasta el momento, se obtuvo la misma para un estado estacionario de este importante recurso hídrico.

El acuífero Raigón es un sistema hidráulico subterráneo en medio sedimentario, situado en el departamento de San José, Uruguay, inmediatamente al oeste de Montevideo. Abastece poblaciones y explotaciones industriales, agrícolas y ganaderas que vierten efluentes con y sin tratamiento sobre la capa freática, por lo que se ve sujeto, como todo acuífero, al posible deterioro de la calidad de sus aguas como consecuencia de actividades potencialmente contaminantes.

El propósito perseguido al estudiar la vulnerabilidad de este sistema es permitir la planificación a efectos de atender solicitudes para la radicación de nuevos emprendimientos industriales u otros, manteniendo las condiciones naturales del reservorio subterráneo y asegurando la permanencia de una de las principales fuentes de agua potable en el Departamento.

Existen diversas metodologías para caracterizar la vulnerabilidad de un acuífero. Para obtener el Mapa de Vulnerabilidad del acuífero Raigón, se escogió la metodología DRASTIC, desarrollada por la E.P.A. (Environmental Protection Agency) de los Estados Unidos de América, por ser ésta quien considera más factores físicos y variables que intervienen en el proceso y los cuantifica en forma consistente.

DRASTIC es un sistema paramétrico de evaluación que incluye siete características fundamentales a las que asigna, valores numéricos entre 1 y 10 de acuerdo a la importancia relativa de cada una en la existencia y expresión del agua subterránea, que se escoge de acuerdo al acuífero particular de que se trate, y un multiplicador entre 1 y 5 (peso según su importancia) recomendado por los autores del método para expresar generalidades propias del agua del subsuelo. Como resultado de esta evaluación se obtiene un mapa, mostrando zonas con mayor o menor sensibilidad a la contaminación.

La dinámica de los sistemas acuíferos hace que los Mapas de Vulnerabilidad no sean estáticos. Variaciones en las condiciones de acceso, presencia y movimiento del agua, originan cambios en las variables de estado de los sistemas. El seguimiento de estos cambios y la importancia de los mismos pueden conducir a la revisión de estos mapas, y a su modificación y corrección temporal. Teniendo en cuenta que los cambios en un sistema hídrico subterráneo son lentos, es conveniente hacer estos controles cada década aproximadamente.

ÁREA DE ESTUDIO

La determinación de los límites del área de estudio se realizó a partir de la Carta Geológica del Uruguay (DINAMIGE, Escala 1:500.000), tomando como límite general los afloramientos de rocas ígneas al Norte y los límites naturales al Este y al Sudoeste. De esta forma, y utilizando accidentes geográficos cercanos al borde de afloramiento del Basamento Cristalino, siempre que los hubiere, la delimitación de la zona de estudio viene dada del siguiente modo: al Noroeste el Arroyo Pavón, afloramiento de basamento cristalino, Arroyo Luis Pereira, Arroyo Llano; al Norte tramos de rutas 11 y 3, Río San José, Arroyo Carreta Quemada, basamento cristalino; al Noreste y Este el Arroyo de la Virgen y el Río Santa Lucía; y al Sur, el Río de la Plata. La región considerada abarca aproximadamente 2200 km², e incluye completamente al acuífero (Figura N° 1).

El sistema hidrogeológico se desarrolla principalmente a través de la Formación Raigón, aunque se consideran zonas constituidas por la Fm. Fray Bentos, en que la conductividad hidráulica es mucho menor, y por el basamento cristalino, en que el flujo puede darse a través del medio fisurado. Otras manifestaciones de la Fm. Raigón con capacidad de almacenamiento hídrico se dan también al Oeste del Arroyo Pavón en el Dpto. de San José, y se observan asimismo afloramientos al Noreste de la zona en estudio.

CONCEPTOS BÁSICOS

La ciencia que estudia la ocurrencia, la distribución y el movimiento del agua por debajo de la superficie terrestre se denomina *Hidrología Subterránea*, y también *Geohidrología*. La palabra *Hidrogeología* se usa muy frecuentemente para denominar esta ciencia, aunque el vocablo debería utilizarse particularmente cuando se estudia con más profundidad el aspecto geológico (Pérez Franco, 1982). El agua que se infiltra en el terreno y queda por debajo de la superficie del mismo, sufrirá un proceso que va a permitir que al ocupar los intersticios o poros del terreno y de las rocas, quede situada a distintas profundidades, ocupando dos zonas: la zona no saturada o de aeración y la zona de saturación. En la zona de aeración los intersticios están ocupados parcialmente por agua y por aire, y el agua en exceso drena verticalmente (percola) por la acción de la gravedad, hasta alcanzar la zona de saturación. En la zona de saturación todos los intersticios están ocupados por agua sometida, además, a presión hidrostática. El agua contenida en la zona de aeración se designa como agua suspendida o vadosa y el agua de la zona de saturación es el agua subterránea propiamente dicha.

Los estratos o formaciones geológicas que ocupan la zona de saturación y que son capaces de almacenar y transmitir agua para subvenir las necesidades del hombre, reciben el nombre de *acuíferos*, *embalses* o *cuencas subterráneas*. Los conceptos del autor antes citado quedan representados gráficamente en la Figura N° 2.

En un acuífero se distinguen tres partes elementales: el área de acceso del agua de infiltración o zona de recarga, la zona de almacenamiento y transmisión del agua y la zona de descarga (manantiales, arroyos, ríos, lagos, mar).

Cuando se realiza una obra de captación, puede observarse que una vez concluida y entubada la misma, el agua puede permanecer en el nivel de la zona de saturación o superficie freática, a presión atmosférica. El estrato atravesado estará sustentado sobre

una superficie más o menos continua e impermeable, constituyendo un *acuífero libre*. En cambio, si el estrato portador y transmisor se encuentra encerrado entre dos capas impermeables, la superficie del agua en el tubo se encontrará por encima del nivel de la capa impermeable superior, tratándose en este caso de un *acuífero cautivo o confinado*, y pudiendo darse que incluso supere el nivel de boca de pozo, produciéndose surgencia natural. Los acuíferos libres y confinados son los dos casos más comunes en la expresión del agua subterránea en la naturaleza.

Por último, la zona saturada puede estar contenida estructuralmente en sedimentos o en fracturas interconectadas de roca compacta.

El medio físico puede darle cierto grado de protección a los acuíferos al oficiar como purificador de agua contaminada cuando ésta percola a través del suelo y otros estratos de la zona no saturada. El grado de atenuación que el ambiente físico pueda efectuar y el tipo de contaminante determina el potencial relativo con que un acuífero puede contaminarse.

La vulnerabilidad es una propiedad intrínseca de los sistemas de agua subterránea que depende de la sensibilidad de estos a impactos humanos y/o naturales, y es función de factores hidrogeológicos que determinan tanto la inaccesibilidad de la zona saturada a la penetración de contaminantes como la capacidad de atenuación de los estratos por encima de ella. Las propiedades del medio varían de un punto a otro, lo que hace variable el potencial de un acuífero para protegerse, razón para que algunas áreas sean más vulnerables que otras.

Como resultado de la evaluación de la vulnerabilidad pueden obtenerse mapas mostrando zonas con mayor o menor sensibilidad a la contaminación, que generalmente se construyen para el acuífero superior o freático. Estos niveles permiten valorar la vulnerabilidad en forma relativa entre las regiones que integran el área de estudio.

La confección de un mapa de vulnerabilidad implica combinar varios mapas temáticos, correspondientes a los factores hidrogeológicos elegidos para la evaluación. Los cambios en el sistema acuífero hacen que el mapa de vulnerabilidad no sea estático, sino que deba ser actualizado en el correr del tiempo.

Los mapas de vulnerabilidad tienen múltiples propósitos y son útiles, sobre todo, a nivel gubernamental. Su principal cometido es servir de guía en la planificación de actividades relacionadas con el medio ambiente y el ordenamiento territorial, siendo una herramienta fundamental para definir qué utilización pueden tener determinadas zonas, y en el desarrollo de políticas de protección para las aguas subterráneas subyacentes a la superficie de asentamiento de actividades existentes.

METODOLOGÍA

La metodología DRASTIC es un sistema paramétrico de evaluación e incluye, como ya se explicó, siete características fundamentales, a las que asigna valores, y un multiplicador (peso según su importancia). Gran parte del presente trabajo consistió en la ponderación de esos siete parámetros, a saber:

D - Profundidad al acuífero (Depth to water)

R - Recarga neta (Recharge)

A - Tipo de acuífero (Aquifer media)

S - Tipo de suelo (Soil media)

T - Topografía, Pendiente (Topography)

I - Impacto del tipo de zona vadosa (Impact of the Vadose Zone Media)

C - Conductividad hidráulica (Conductivity of the aquifer)

Es importante resaltar que, de esta forma, se cubren los aspectos más importantes que influyen tanto en la inaccesibilidad al acuífero como en los fenómenos de atenuación de la contaminación. Para describir cada una de estas propiedades son necesarios estudios específicos y detallados, los que una vez concluidos se valoran en su actuación conjunta a través de la metodología y sus conceptos. Como cualquier herramienta que valora la vulnerabilidad, DRASTIC se apoya en valoraciones cualitativas, pero al ser imprescindible para su uso elementos tales como la recarga y la conductividad hidráulica, sugiere la precalibración de un modelo numérico, aportando de este modo valoraciones cuantitativas específicas y aportando una visión más general y diversa de los aportes de cada propiedad al producto final.

DRASTIC permite encontrar un valor numérico para cada punto del área de trabajo mediante la siguiente ecuación:

$$D_R D_W + R_R R_W + A_R A_W + S_R S_W + T_R T_W + I_R I_W + C_R C_W = \text{Índice de vulnerabilidad}$$

donde los subíndices R y W son el puntaje (rating) y el peso de ponderación (weight) respectivamente. Esta suma expresa la conjunción de las valoraciones de cada propiedad, aportadas por el método, y el conocimiento del acuífero particular del que se trata por parte de quienes lo aplican.

La Tabla N°1 muestra los pesos de cada parámetro según los autores de la metodología.

Tabla N°1 - Pesos asignados a los distintos factores

Parámetro	Peso
Profundidad al acuífero	5
Recarga neta	4
Tipo de acuífero	3
Tipo de suelo	2
Topografía (pendiente)	1
Impacto de la zona vadosa	5
Conductividad hidráulica del acuífero	3

OBTENCIÓN DE DATOS

Se digitalizaron las principales características geográficas del área. A partir de las cartas 1:50000 del Servicio Geográfico Militar (SGM) se registraron los principales cursos de agua, los bañados, los caminos y rutas, los poblados, y las curvas de nivel cada 10 m referidas al cero oficial (nivel medio de las aguas en el puerto de Montevideo). La topografía se desarrolla principalmente entre los 10 m y los 40 m, con pendientes moderadas, encontrándose al Noroeste y Norte de la región elevaciones de hasta 70 metros, alcanzando 90 metros en el extremo oeste.

Mucha de la información utilizada en este trabajo, surgió de los datos reunidos y la información obtenida en el marco del proyecto CONICYT - BID 71/94 "Modelación Numérica del Sector Este del Acuífero Raigón" que realizara la Facultad de Ingeniería entre 1995 y 1998. Para completar y revisar la información existente, se solicitó a distintas oficinas públicas y privadas datos de perforaciones ejecutadas o conocidas.

Se generó una base de datos con la descripción constructiva y geológica de perforaciones ubicadas en el área de estudio. Esta información fue utilizada para definir la geometría del acuífero, lo que permitió evaluar los parámetros para la aplicación de la metodología DRASTIC.

Las medidas de niveles piezométricos correspondieron al Proyecto CIID-DINAMIGE (1985/92). Se utilizaron niveles de pozos seleccionados de la red de monitoreo instalada por DINAMIGE y relevados en la campaña realizada por la misma Dirección en octubre de 1986, cuando el acuífero estaba prácticamente inexplorado, lo que permitió suponerlo en estado estacionario.

En el marco del Convenio IMFIA - DINAMA se recorrió el área de estudio, escogiendo puntos de medida de niveles estáticos en la capa freática y su contorno. Se procuró una distribución espacialmente homogénea y representativa. Tras la visita a los distintos establecimientos donde se localizaban las perforaciones o excavaciones, se escogieron 31 puntos, que sumados a 51 existentes en el Banco de Datos del IMFIA, pasaron a ser monitoreados en una campaña continua de medidas que permitió mostrar la superficie freática en junio de 1999. Los puntos seleccionados fueron ubicados con GPS, trabajo realizado por el Instituto de Agrimensura en conjunto con el IMFIA.

Las variaciones en los niveles estáticos se deben conjuntamente a la mayor explotación del sistema y a condiciones de sequía recurrentes en la última década. La Figura N° 3 muestra características del sistema acuífero estudiado.

ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS

Se explica en lo siguiente la selección de los puntajes asignados para cada propiedad.

Profundidad

A partir de las curvas de nivel digitalizadas se realizó una interpolación para obtener una capa de topografía que permitiera acotar los niveles de terreno para poder conocer la profundidad aproximada del nivel estático en cada punto. Por otro lado, se confeccionó la piezometría con interpolación por krigeado a partir de los niveles freáticos.

De la diferencia entre ambas capas (topografía y freatigrafía) se obtuvo el mapa de distancias entre la superficie del terreno y la superficie freática. Posteriormente se asignó a distintas zonas el puntaje correspondiente a cada rango de DRASTIC (Tabla N°2), donde, a menor profundidad, mayor peligro de contaminación existe. La Figura N°4 permite observar el mapa temático correspondiente.

Tabla N°2 - Puntajes utilizados para la Profundidad

Rango de Profundidades (m)	Puntaje
0.0 – 1.5	10
1.5 – 4.5	9
4.5 – 9.0	7
9.0 – 15.0	5
15.0 – 23.0	3
23.0 – 30.5	2
>30.5	1

Recarga

Tabla N°3 - Rangos y puntajes para la recarga neta.

Recarga neta (m/día)	
Rango	Puntaje
0 - 0.00014	1
0.00014 - 0.00028	3
0.00028 - 0.00049	6
0.00049 - 0.00070	8
> 0.00070	9

La recarga se ajustó mediante modelación numérica, considerando como superficie freática la obtenida por las mediciones de DINAMIGE en octubre de 1986. En el sector sudeste, limitado por el Río de la Plata, el Río San José y los arroyos San Gregorio y Sauce, se contó con mayor cantidad de datos y mejor descripción de los mismos, por ser la zona de más uso de agua subterránea. Los niveles en los sectores ubicados al oeste y al norte del área citada se calibraron con un acuerdo aceptable, pese a las menores posibilidades debidas a la escasez de datos. De esta manera, se obtuvo el mapa temático

correspondiente a la recarga hidráulica en su forma final para toda el área de estudio en régimen estacionario. Los mayores valores se corresponden con la mayor recarga. La Figura N°5 muestra los resultados de la calibración del modelo numérico en cada subdivisión establecida, y la Figura N°6 los puntajes DRASTIC de la recarga.

Tipo de acuífero

El sistema acuífero está constituido por la Formación Raigón. Su ambiente de deposición corresponde a fluvial en la cima y litoral en la base y parte central, en condiciones de clima seco y frío, Bossi (1988). Se constituye por arenas que varían de finas a gravas, cuarzo feldespáticas, blanco grisáceas, subangulosas, con niveles conglomerádicos y lentes de arcillas grisáceas y verdes.

La base de Raigón la componen la Formación Fray Bentos, la Formación Camacho y el Complejo Basal. Raigón se apoya sobre Camacho en concordancia estratigráfica, con pasajes gradacionales de una a otra formación. La Formación Raigón se presenta en parte cubierta por limos arcillosos de las Formaciones Libertad y Dolores, y en parte, aflorando.

La geología utilizada responde a los trabajos realizados por los geólogos en el marco del Convenio DINAMA – IMFIA y en el Proyecto CONICYT-BID. Los resultados a los cuales arribó fueron en base a la revisión de trabajos anteriores, al análisis de información de perforaciones y al desarrollo de actividades de campo.

En algunas zonas de la región afloran formaciones geológicas subyacentes a la formación Raigón – Fray Bentos y Basamento Cristalino –, lo cual indica la ausencia de la misma. En estas zonas se asumió la existencia de flujo de agua a través de estratos preferentes.

Por estar el Basamento Cristalino compuesto por Gneiss, se le asignó un puntaje 3, como prevé el método para las rocas ígneas y metamórficas. La Fm. Fray Bentos está constituida por areniscas muy finas con mucho contenido de arcilla, y por lo tanto se le adjudicó el puntaje 4, que es el mínimo previsto para las areniscas. La Fm. Raigón por lo contrario está formada por areniscas finas a conglomerádicas mal seleccionadas con estratificaciones, lo que le da un carácter poco atenuador (dada la mayor facilidad del agua para fluir y la menor área relativa de los granos para entrar en contacto con el líquido). Se asignó puntaje 8 a la Fm. Raigón. La Tabla N°4 resume los puntajes otorgados y la Figura N°7 los muestra gráficamente.

Tabla N°4 - Puntajes utilizados para los materiales componentes del acuífero

Tipo de acuífero	Puntaje
Basamento Cristalino	3
Fray Bentos	4
Raigón	8

Suelo

La confección de un mapa de suelos se realizó en base a fotointerpretación y relevamientos de campo para la parte norte del acuífero, que queda excluida de la Carta de

Suelos de San José elaborada por la Dirección de Suelos y Aguas. Por otra parte, se agruparon las unidades de la Carta de Suelos para la porción sur de forma tal que resultara un mapa de suelos con escala uniforme. El criterio de agrupación de las unidades atendió en general a la textura de los distintos tipos de suelo, siendo esta propiedad la que define el mayor o menor índice.

Luego se asignaron los puntajes, teniendo en cuenta las recomendaciones de la metodología DRASTIC, a las distintas unidades según muestra la Tabla N°5. La Figura N°8 corresponde al mapa temático.

Tabla N°5 – Rangos y puntajes para los tipos de suelo

Tipo de Suelo	
Unidad	Puntaje
Playas	9
Cristalino	8
Dunas Costeras	7
Libertad sobre cristalino	7
Raigón	5
Bañados	5
Libertad / Dolores	4
Bajos	3

Topografía

Tabla N°6 - Rangos y puntajes para la topografía.

Pendiente(%)	
Rango	Puntaje
0 – 2	10
2 – 6	9
6 – 12	5
12 – 18	3
>18	1

A partir de varios modelos de topografía generados por interpolación se calcularon mediante propiedades del sistema de información geográfico GRASS las pendientes en toda el área. Los resultados fueron similares, y se eligió el modelo que arrojaba valores de pendiente menores, para estar del lado seguro. Posteriormente se dividió el área en zonas según los rangos previstos por el método, y se obtuvo el mapa de las pendientes.

Puede observarse que se está frente a una topografía suave (salvo en las barrancas contra la costa), donde la oportunidad del agua para infiltrarse – y con ella los contaminantes – es alta, dependiendo del porcentaje de pendiente la posibilidad de acceso de la sustancia contaminante. La Figura N°9 permite apreciar la distribución de estos puntajes.

Impacto de la Zona Vadosa

La zona vadosa está constituida por la misma Formación Raigón en su parte no saturada y las formaciones que la cubren. En los lugares donde afloran la Fm. Fray Bentos y el Basamento Cristalino – bases de la Fm. Raigón – son estas mismas las que conforman la zona vadosa. Dadas las características de cada formación geológica se asignó a cada una de ellas el puntaje que se detalla en la Tabla N°7, en función de lo recomendado por el método. La Figura N°10 muestra la distribución areal de los puntajes obtenidos.

Tabla N°7 - Puntajes utilizados para el impacto de la zona vadosa

Formación aflorante	Puntaje
Basamento Cristalino	4
Fray Bentos	2
Raigón	8
Chuy	7
Libertad	4
Dolores	4
Villa Soriano	7
Reciente y Actual	7

A los efectos de valorar el índice de vulnerabilidad hay que considerar el estrato más atenuante de los que estén por encima del nivel freático. Este estrato de menor puntaje no tiene por qué coincidir con la formación aflorante. En función de ello se estudió cada caso.

Tras el análisis de cada formación y su actuación conjunta se decidió asociar el impacto de la zona vadosa directamente a través de la Carta Geológica de Superficie elaborada a escala 1:100.000.

Conductividad Hidráulica

Tabla N°8 - Rangos y puntajes para la conductividad hidráulica.

Conductividad hidráulica (m/día)	
Rango	Puntaje
0 – 4	1
4 – 12	2
12 – 28	4
28 – 41	6
41 – 82	8
>82	10

La conductividad hidráulica se obtuvo mediante modelación numérica, al igual que la recarga. La Figura N°11 resume los resultados obtenidos.

CARTA DE VULNERABILIDAD DEL ACUÍFERO RAIGÓN

Los Índices máximo y mínimo de Vulnerabilidad Intrínseca para el acuífero Raigón son 194 y 51, respectivamente (1986). Los extremos posibles para cualquier acuífero (metodología DRASTIC) son 226 y 23.

De la conjunción de los mapas correspondientes a cada propiedad se obtuvo el Índice General de Vulnerabilidad para cada punto. La diferencia entre los valores máximo y mínimo obtenidos para el índice en toda el área se dividió entre tres, resultando tres rangos: bajo, medio y alto, tal como puede apreciarse en la Carta. El área que abarca la Carta es 2271 km², de los cuales 294 km² corresponden a áreas de baja vulnerabilidad (13%), 1541 km² a áreas de vulnerabilidad media (68%) y 436 km² a áreas de alta vulnerabilidad (19%).

La mayor parte del área tiene valores medios de índice de vulnerabilidad, destacándose índices bajos en las zonas elevadas del Norte y algunas zonas en el Sur. Los sectores con alta vulnerabilidad aparecen dispersos, concentrándose en zonas cercanas a los arroyos donde aflora la Fm. Raigón, o en zonas de alta recarga. La Figura N°12 muestra el resultado final del trabajo.

COMENTARIOS FINALES

El conocimiento del sistema acuífero, aun hoy, está en una etapa media, y los modelos numéricos deben someterse a correcciones parciales en geometría. Algunas condiciones de borde deben ser estudiadas particularmente (cercanías del Río San José, por ejemplo). De toda el área involucrada, un 60% carece de datos geométricos e hidráulicos rigurosamente confiables.

Sin embargo, con los datos existentes analizados y depurados, la metodología aquí expuesta y la información obtenida y procesada de cada variable en juego, hace de la Carta de Vulnerabilidad del Sistema Acuífero de Raigón una valiosa herramienta de planificación básica, con la que se podrá seguir la evolución del sistema a través de los años, y permitirá acceder a evaluaciones de riesgo a la acción de contaminantes definidos.

El Ordenamiento Territorial y la protección del Medio Ambiente, así como los planes de monitoreo y seguimiento de actividades implantadas, se ven favorecidas por la aplicación de estas herramientas obtenidas a partir del conocimiento y estudio de los factores físicos involucrados en la protección natural de los sistemas hídricos.

La Carta de Vulnerabilidad del Acuífero Raigón y los comentarios provenientes de su obtención, presentados en los capítulos anteriores, junto al modelo numérico preliminarmente calibrado para el estado estacionario del sistema que fuera utilizado para la confección de este documento, permiten una poderosa base de gestión para buena parte de los recursos hídricos del departamento de San José.

AGRADECIMIENTOS

- Al Ing. Javier Rodríguez, al M.Sc. Leonardo Almagro, a los Ingerieros Agrónomos Juan Horacio Molfino y Ma. Cecilia Petraglia, por su participación directa o indirecta en la confección de la Carta de Vulnerabilidad del Sector Este del Acuífero Raigón, 1° parte de este Proyecto.
- A Ingenieros Consultores Asociados.
- A Enrique Grosse por su colaboración brindada en la diagramación y confección final del texto y las piezas gráficas.

BIBLIOGRAFÍA

- **Allan Freeze, R., Cherry, J.** 1979. *Groundwater*. Prentice-Hall, N.J., U.S.A.
- **Aller, L. et al.** 1987. *DRASTIC: A standardized system for evaluating ground water pollution potential using hidrogeologic settings*. EPA/600/2-87/035, U.S.A.
- **Bear, J., Verruijt, A.** 1987. *Modeling groundwater flow and pollution*. D. Reidel Publishing Company, Holland, 414 pgs.
- **Boulding, Russell.** 1995. *Practical handbook of soil, vadose zone, and ground-water contamination: assessment, prevention, and remediation*. Lewis Publishers. U.S.A..
- **Carballo, E., INYPSA.** 1995. *Estudio Acuífero Raigón. Informe Final*. PRENADER. Uruguay.
- **Custodio, E., Llamas, M.** 1976. *Hidrología Subterránea* (Tomos I y II). Ediciones Omega, Barcelona, España, 2290 pgs.
- **de los Santos, J. et al.** 1998. *Modelación Numérica del Acuífero Raigón*. Proyecto CONICYT – BID 71/94. IMFIA, UdelaR. Uruguay.
- **de los Santos, J. et al.** 1999. *Carta de Vulnerabilidad del Acuífero Raigón*. Informe Final. Convenio DINAMA-IMFIA. IMFIA, UdelaR. Uruguay.
- **de Marsily, G.** 1986. *Quantitative Hydrogeology*. Academic Press, Inc. , California, U.S.A., 440 pgs.
- **Dirección Nacional de Minería y Geología (DINAMIGE).** 1993. *Geología e Hidrogeología de la subcuenca inferior del Río Santa Lucía*. Informe final (Inédito). International Development Research Centre (IDRC), Montevideo, Uruguay.

- **Foster S., Hirata, R.** 1991. *Determinación del riesgo de contaminación de aguas subterráneas, una metodología basada en datos existentes*. Segunda edición revisada. CEPIS OPS OMS. Perú.
- **Iakubovskii, IU. V., Liajov, L.L.** 1980. *Exploración eléctrica*. Ed. Reverté, Barcelona, España, 421 pgs.
- **Mc. Donald M., Harbaugh A.** 1988. A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model. Books and Open-File Reports Section, U.S.G.S., Colorado, U.S.A., 585 pgs.
- **Meskale, M.H.** 1989?. *Un estudio integral de la cantidad y de la calidad del agua subterránea en la subcuenca inferior del Río Santa Lucía*. Tesis Parcial de Doctorado, Univ. de Montreal en Quèbec, Canadá.
- **Orellana, E.** 1982. *Prospección geoelectrónica en corriente continua*. De. Paraninfo, Madrid, España, 578 pgs.
- **Pérez Franco, D.** 1982. *Hidráulica Subterránea*. Ed. Científico - Técnica, La Habana, Cuba.
- **Pérez Peirano. M.** 1991. *Litoestratigrafía y Sedimentología de las Formaciones Raigón y Libertad*, Suroeste del Dpto. de San José (Uruguay). Tesis de Maestría en Ciencias de la Tierra, Univ. de Montreal en Quèbec, Canadá.
- **Todd, D.K.** 1980. *Groundwater hydrology*. John Wiley & Sons, U.S.A., 535 pgs.
- **Vrba, J. et al.** 1994. *Guidebook on Mapping Groundwater Vulnerability*. International Contributions to Hydrogeology. Vol 16. Heise. Alemania.

Bibliografía consultada en Geología

- **Bossi, J., Navarro, R.** 1991.- *Geología del Uruguay*. 2 Tomos. Oficina de Publicaciones de la Univ. de la Rep. Montevideo, Uruguay.
- **Caorsi, J.H., Goñi, J.** 1958.- *Geología Uruguaya*. Inst. Geol. Uruguay, Bol. 37, pp 1-73, Montevideo, Uruguay.
- **Delaney, P.** 1963.- Fisiografía e geología da superficie da planície costeira do Rio Grande do Sul. Tes. Fac. Filos. Ciencias e Letras, Univ. de Sao Paulo.
- **Goso, H.** 1965.- *El Cenozoico en el Uruguay*. Informe interno. Instituto Geológico del Uruguay. Pp 1 – 77.
- **Goso, H.** 1972.- *Cuaternario*.- MAP-PELS. Montevideo, Uruguay. Informe Interno.
- **Goso, C., S. de Souza.** 1993.- Análisis faciológico y paleogeográfico de la Secuencia Mio-pliocénica del sector occidental de la Cuenca del Santa Lucía (Uruguay). V Simposio Sul Brasileiro de Geología.- Curitiba, Brasil.
- **Goso, H., C. Goso, M. Musso, A. Martínez.** 1998.- Estudio Geotécnico del Puente Buenos Aires - Colonia: Materiales para el aprovisionamiento de la Obra. Departamento de Geotécnica, Instituto de Estructuras y Transporte, Facultad de Ingeniería. Montevideo,
- **Hart, S.** 1966.- Radiométric ages in Uruguay and Argentina, and their implications concerning continental drift. San Francisco, USA.

- **Lambert, R.** 1940.- Observaciones Geológicas en la Región Sudoeste del Uruguay. Inst. Geol. Uruguay, Inf. y Notas preliminares. 6: 1-11. Montevideo, Uruguay.
- **Martínez, S.** 1994.- Bioestratigrafía (invertebrados) de la Formación Camacho (Mioceno - Uruguay). Tesis Doctoral N° 2722; FCEN, Universidad de Buenos Aires. Argentina.
- **Serra.** 1943.- Mapa Geológico del Departamento de Colonia. Instituto Geológico del Uruguay. Montevideo, Uruguay.
- **Sprechmann, P.** 1978.- Paleoecología, paleogeografía y estratigrafía de la región costera del Uruguay durante el Neogeno y el Cuartario. Actas del 2ª Congreso Argentino de Paleontología y Bioestratigrafía, y 1º Congreso Latinoamericano de Paleontología. Tomo III.- Buenos Aires, Argentina.
- **Spoturno, J., S. De Souza, E. Peel, R. Guerequiz, P. Collazo.** 1999.- Síntesis Geológica a Escala 1/250.000 de la Cuenca del Santa Lucía. Departamento de Geología, Facultad de Ciencia, Montevideo, Uruguay.- En prensa.
- **Preciozzi, F., Spoturno, J., Heinzen W. y Rossi P.** 1985.- Carta Geológica del Uruguay. Escala 1/500.000.- 2 mapas y memoria explicativa. DI.NA.MI.GE. Montevideo, Uruguay.

Bibliografía consultada en Suelos

- **DGRNR-MGAP**, 1984. *Grupos de Suelos Coneat e Índices de productividad.*
- **MGAP-DSA**, 1979. *Carta de Reconocimiento de Suelos del Uruguay, Tomo III.*
- **MGAP-DSA**, 1979. *Carta de Reconocimiento de Suelos del Uruguay, Tomo I.*

Grupo de Hidrología Subterránea
 Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental
 Facultad de Ingeniería - Universidad de la República - Uruguay
 Tel. 7115278/79 - Fax 7115277 - e-m: raigon@fing.edu.uy

FIGURAS

Figura 1. Delimitación de la zona estudiada

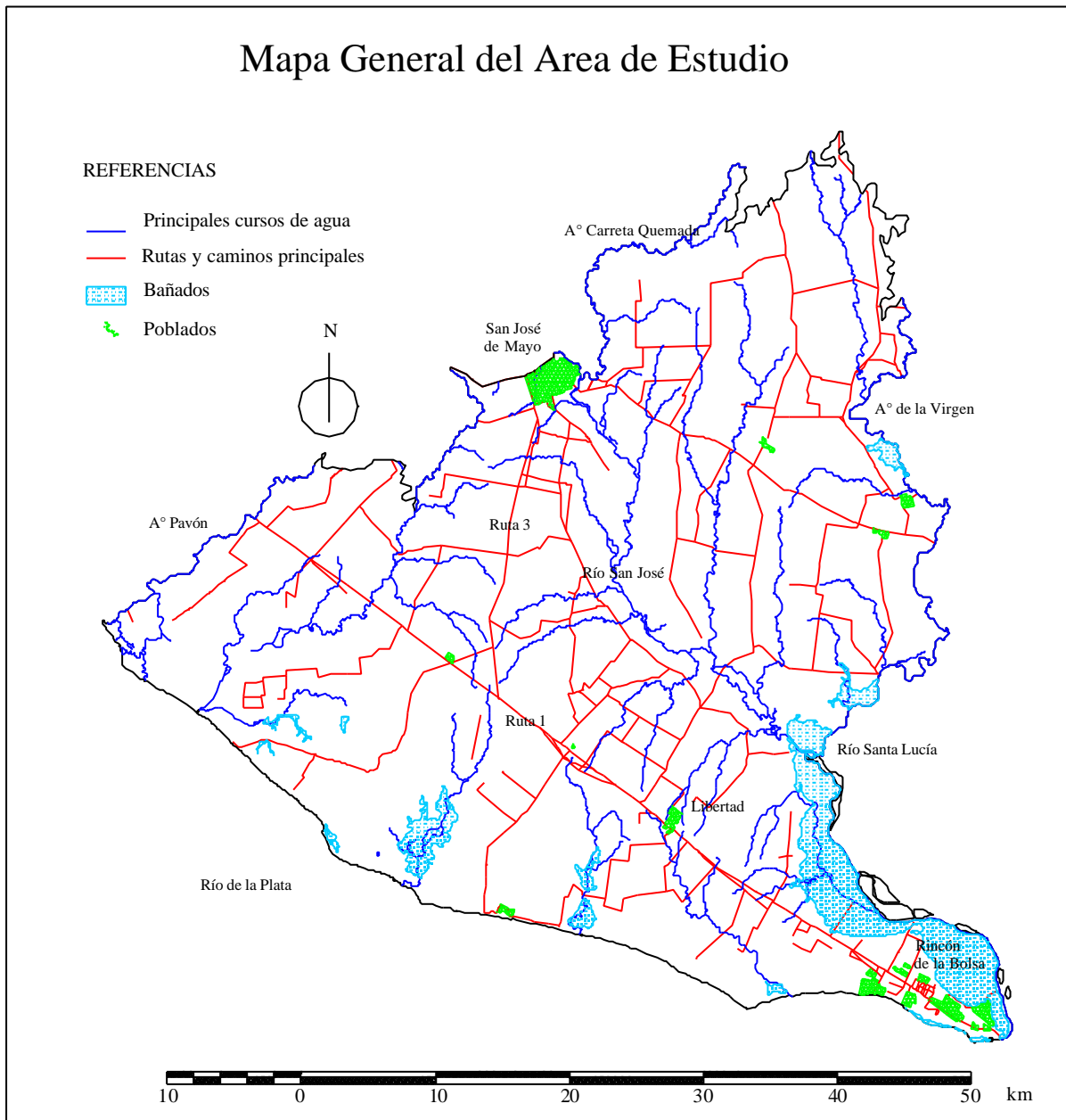


Figura 2. Tipos de acuífero (Bear, 1979)

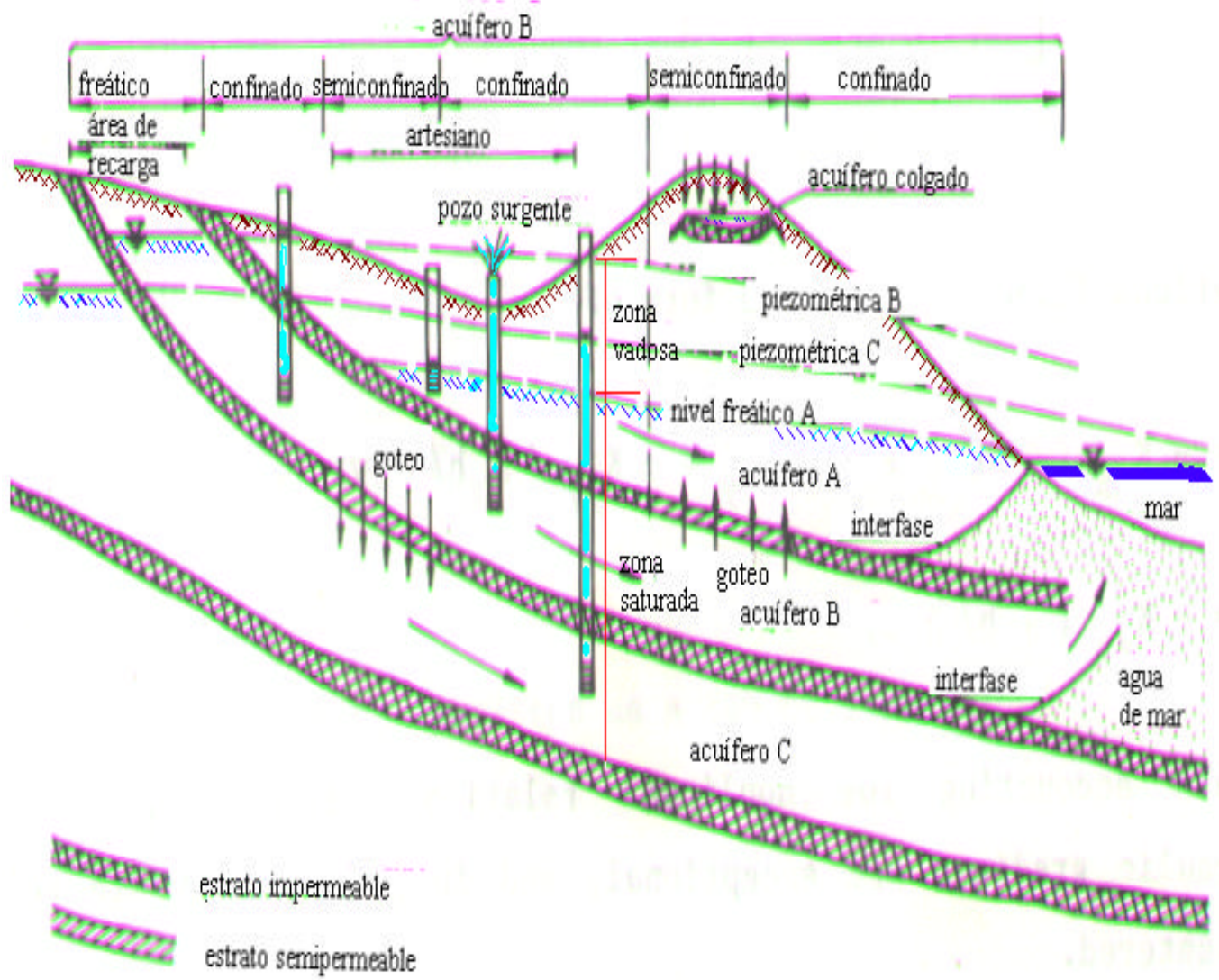


Figura 3: Características del sistema hídrico

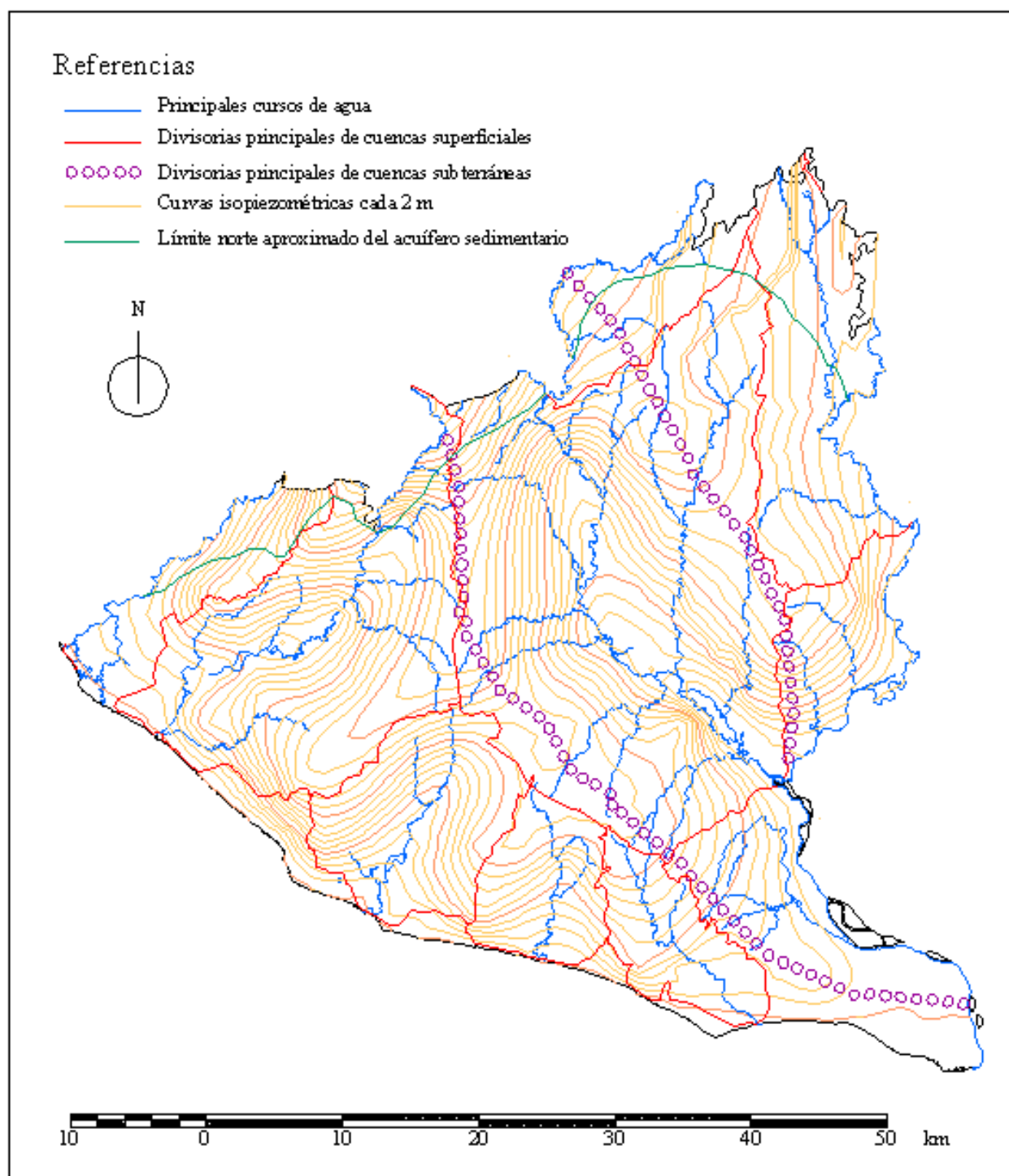


Figura 4. Metodología DRASTIC - Profundidades

Valores DRASTIC para la Profundidad de 1986

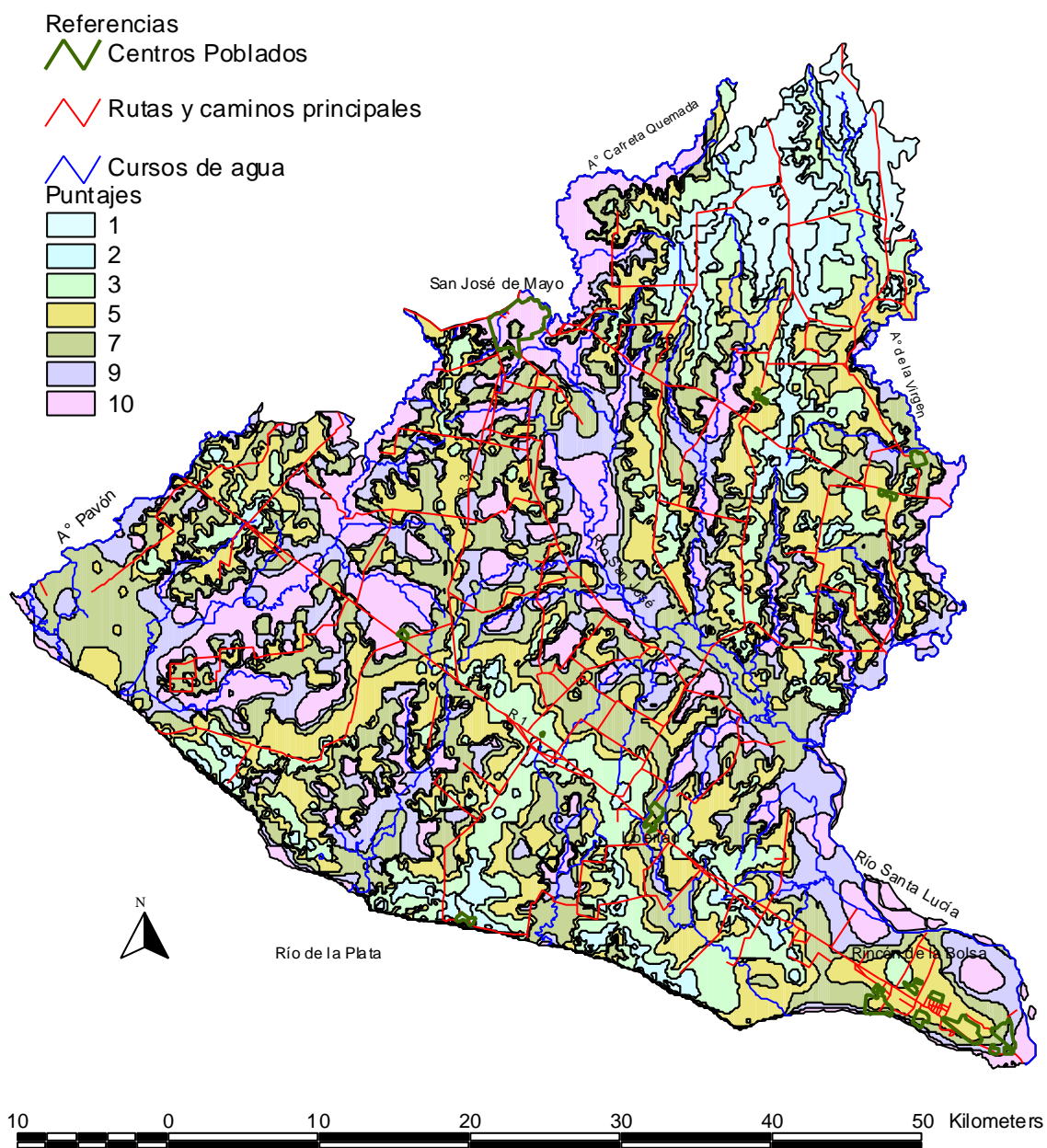


Figura 5: Modelación preliminar del Acuífero Raigón

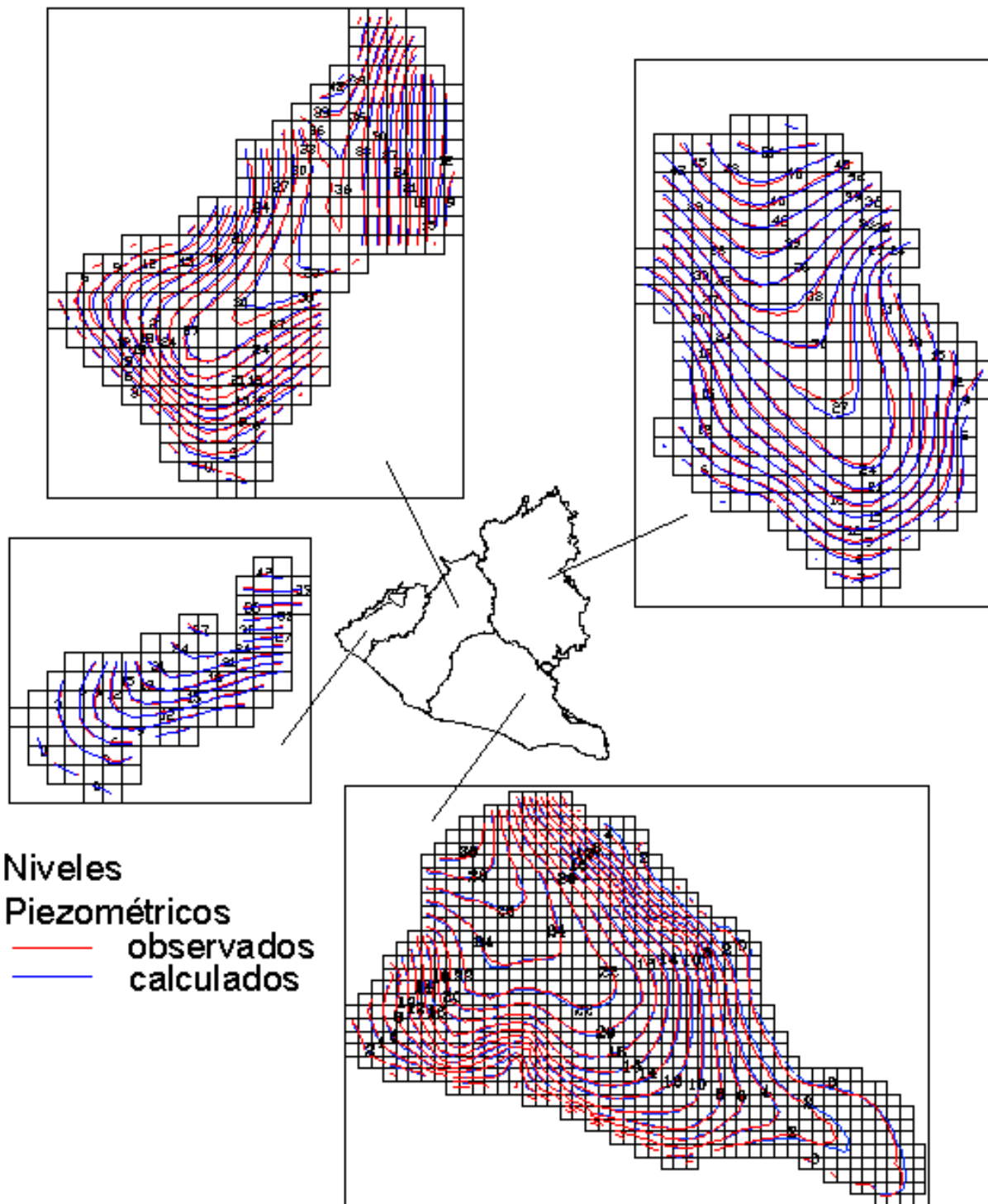


Figura 6. Metodología DRASTIC - Recarga

Valores DRASTIC para la Recarga

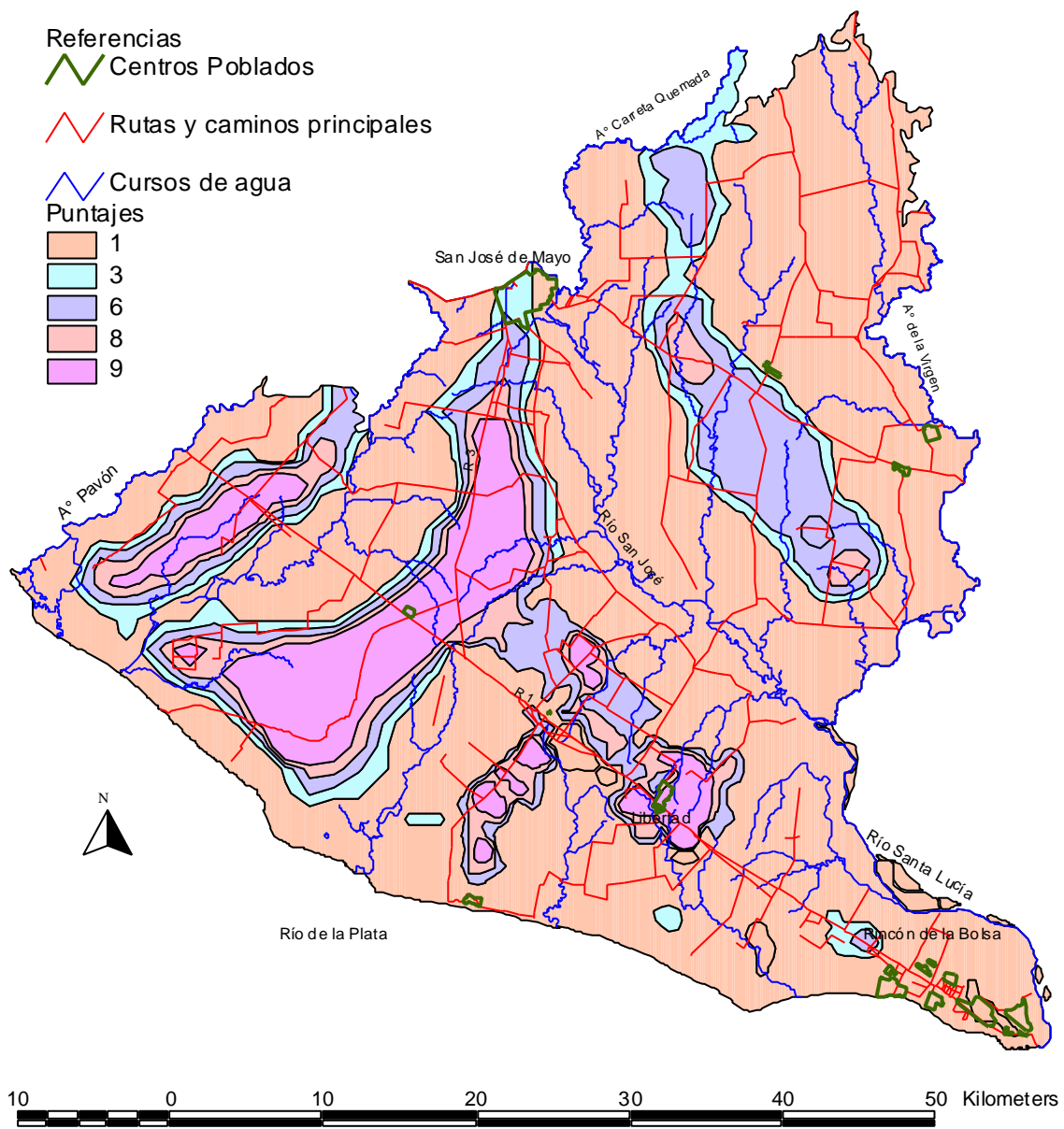


Figura 7. Metodología DRASTIC - Acuífero

Valores DRASTIC para el Tipo de Acuífero

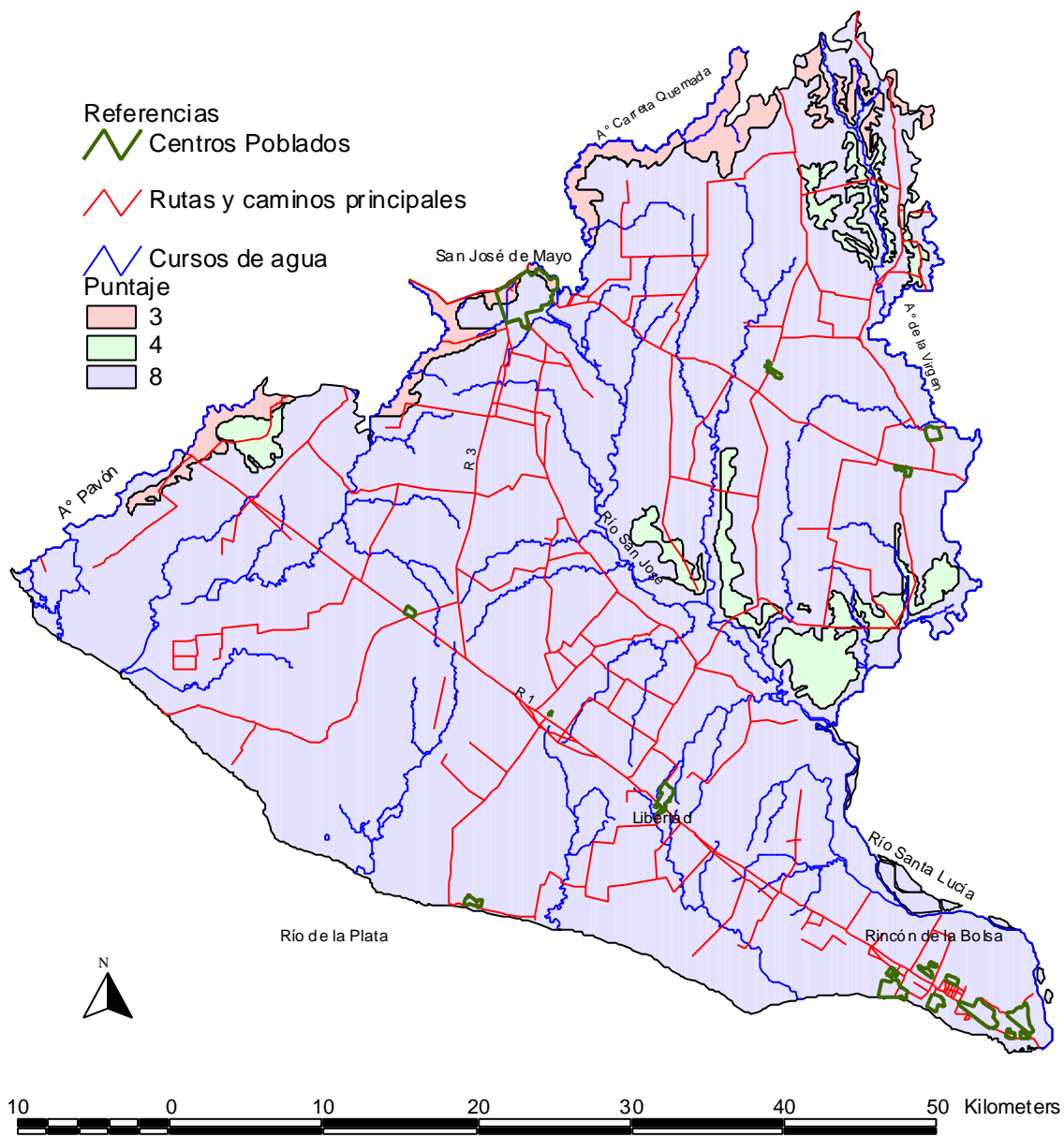


Figura 8. Metodología DRASTIC - Suelo

Valores de DRASTIC para el Tipo de Suelo

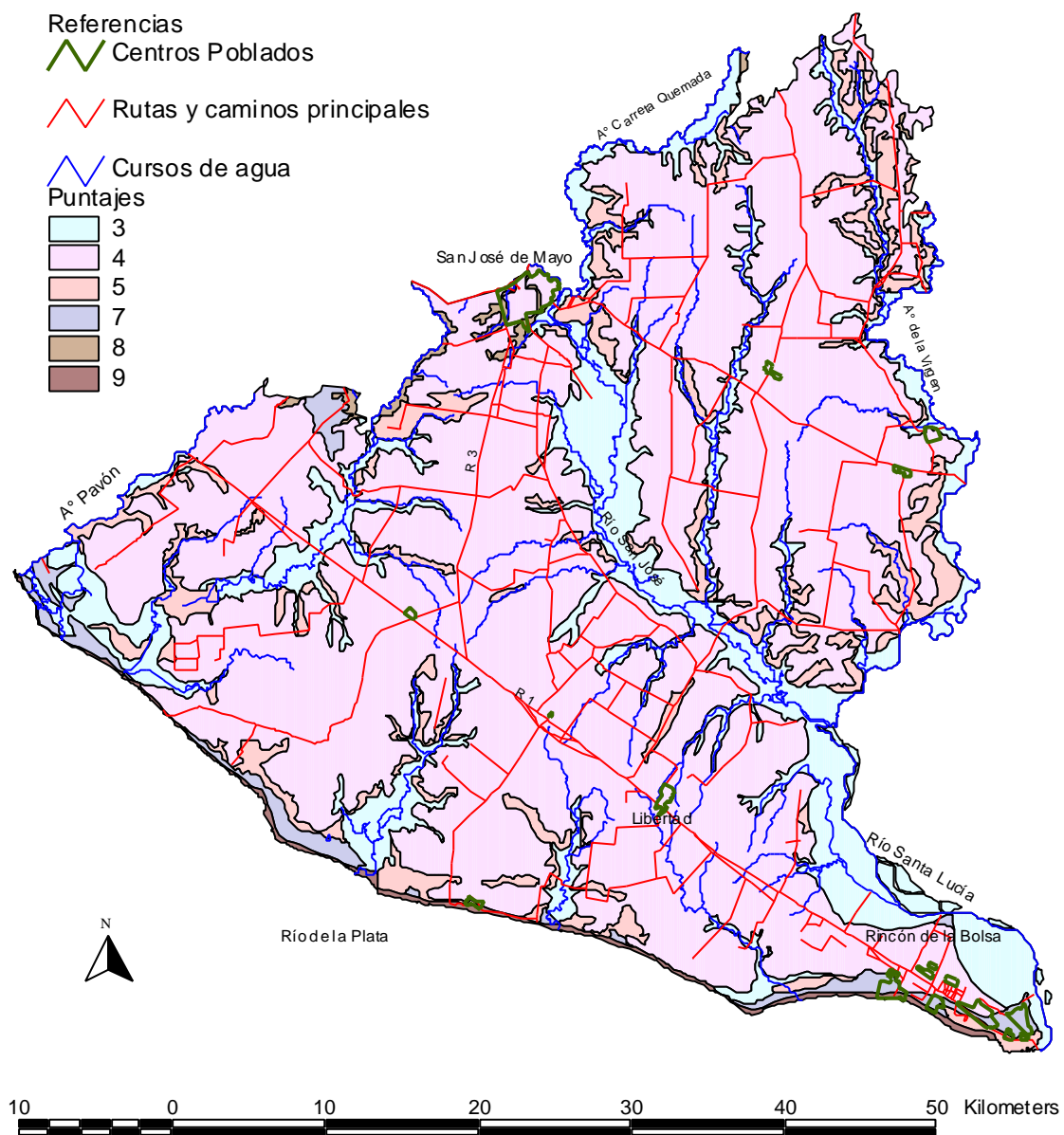


Figura 9. Metodología DRASTIC - Topografía

Valores DRASTIC para la Topografía

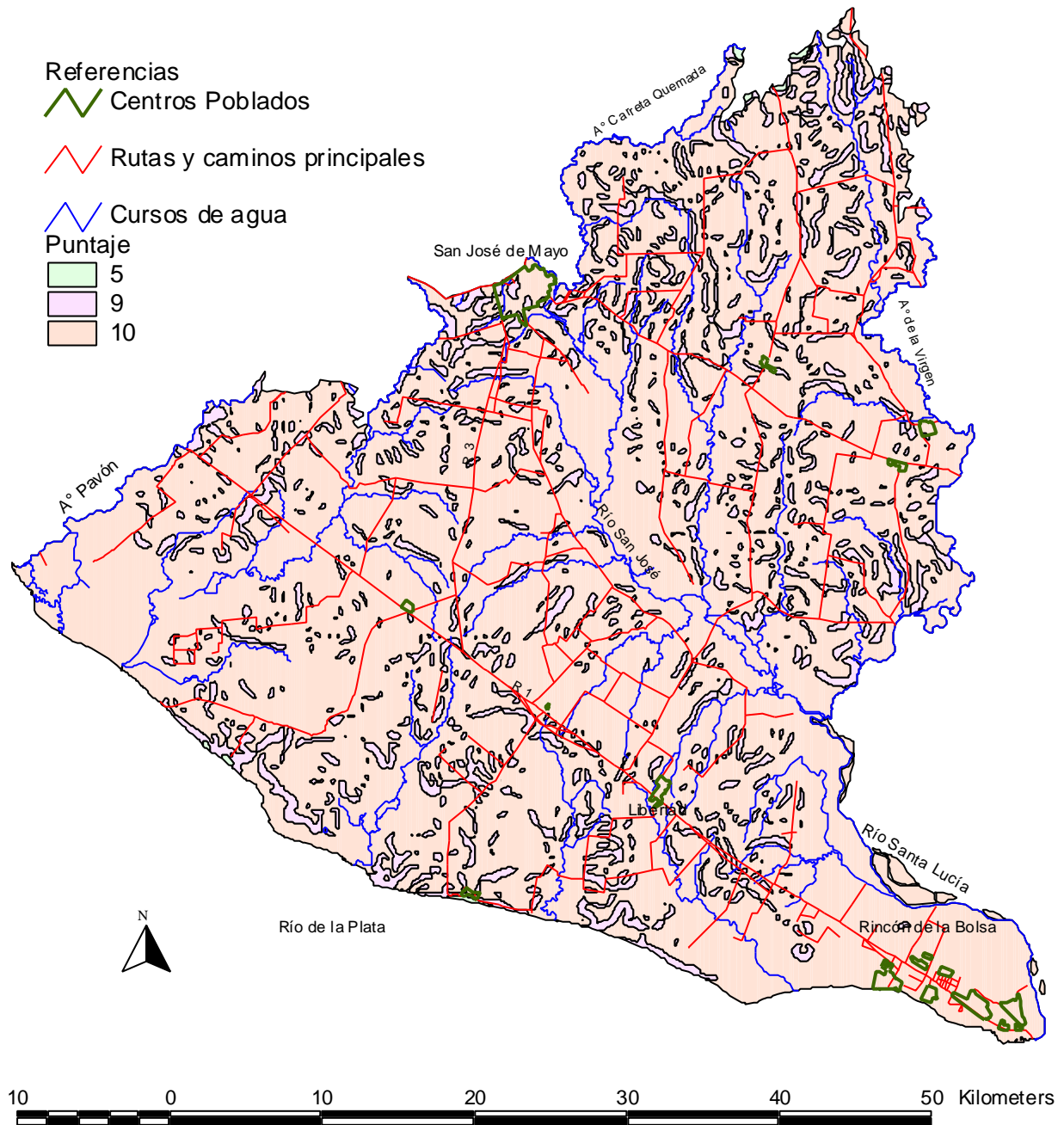


Figura 10. Metodología DRASTIC - Impacto de la Zona Vadosa

Valores DRASTIC para el Impacto de la Zona Vadosa

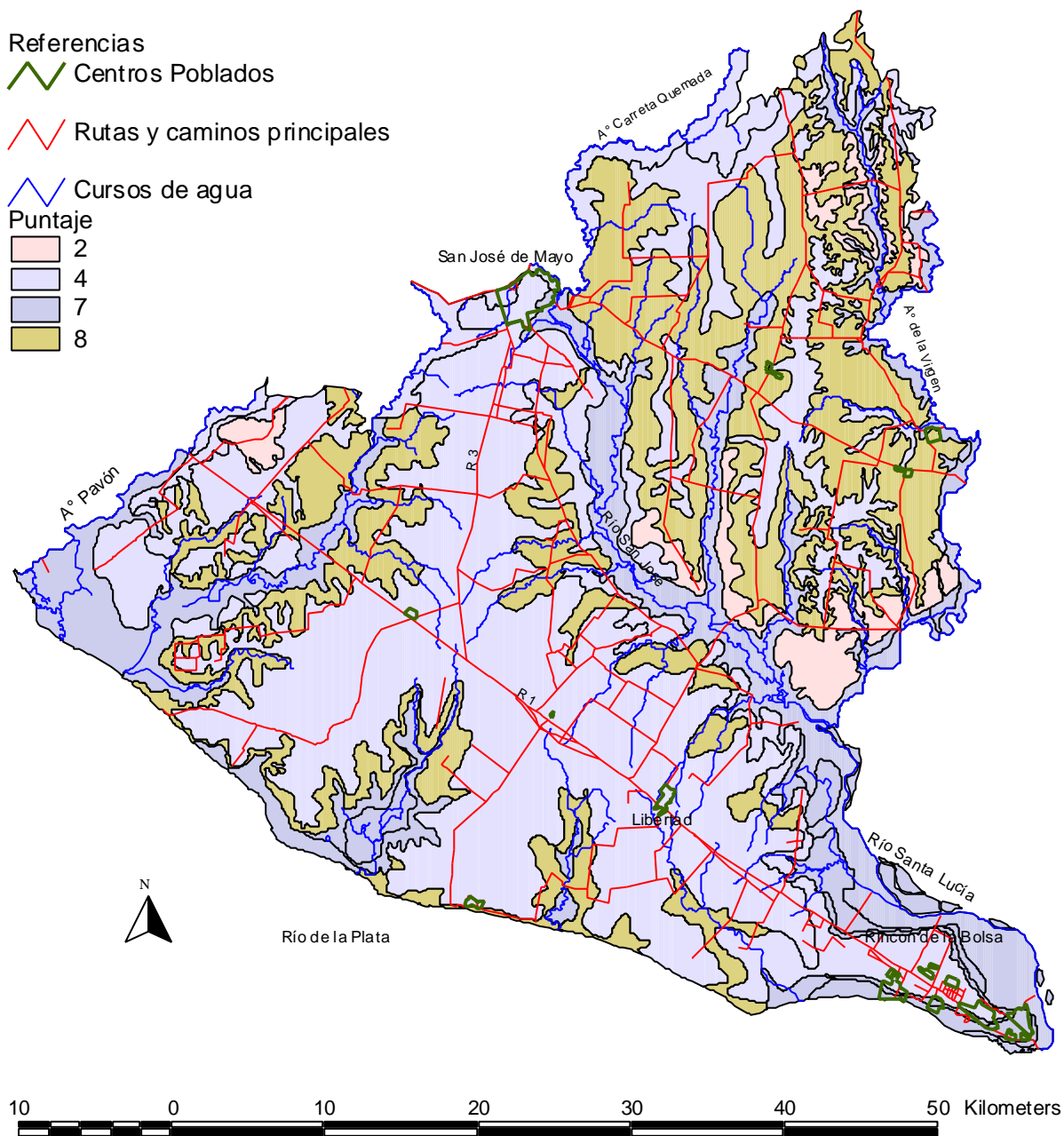


Figura 11. Metodología DRASTIC - Conductividad Hidráulica

Valores DRASTIC para la Conductividad Hidráulica

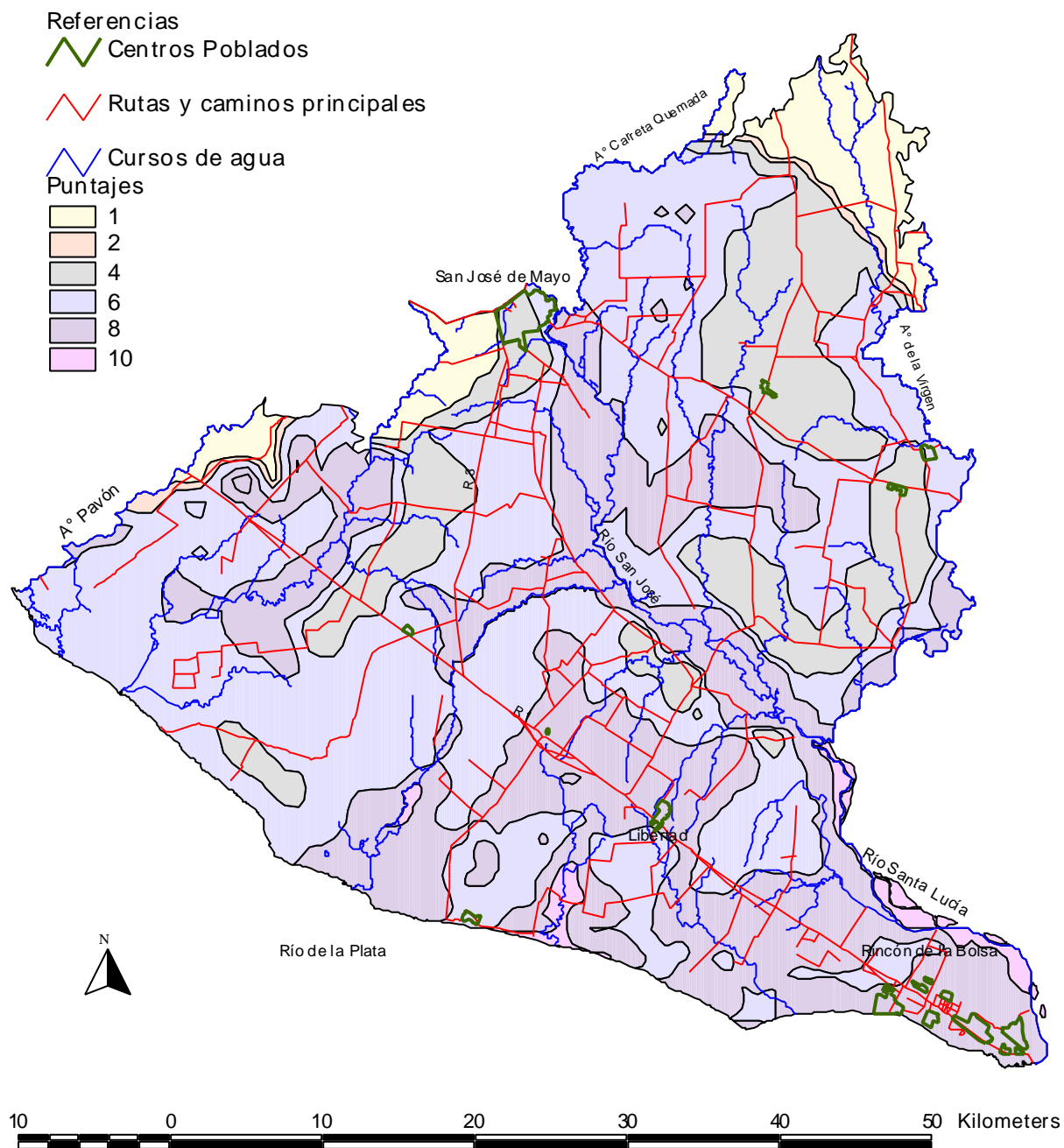


Figura 12. Metodología DRASTIC - Mapa de Vulnerabilidad Intrínseca

Carta de Vulnerabilidad General del Acuífero Raigón (1986)

