

Hernández, M. A. et al., 2009. Un método para estimar la sensibilidad hidrológica aplicado en la cuenca del Golfo San Jorge. Provincia de Chubut. Argentina. *Boletín Geológico y Minero*, 120 (4): 523-532
ISSN: 0366-0176

Un método para estimar la sensibilidad hidrológica aplicado en la cuenca del Golfo San Jorge. Provincia de Chubut. Argentina

M. A. Hernández¹⁾, C. Scatizza^{2)(*)}, M. Rojo³⁾, S. A. Preiato²⁾ y L. Hernández^{2)(*)}

(1) Universidad Nacional de La Plata
scatizza@hotmail.com, lisandro_h@sinectis.com.ar

(2) Hidroar SA

(3) Pan American Energy. Calle 67 N° 1474 (100) La Plata. Argentina.
mario_h@sinectis.com.ar

RESUMEN

Se describe un método desarrollado y utilizado en una zona de la Provincia de Chubut, con el objeto de determinar la sensibilidad hidrológica subterránea y superficial, para orientar la radicación de instalaciones petrolíferas con el menor riesgo ambiental de carácter hídrico posible. Se basa en la conjunción del método GOD para establecer la vulnerabilidad intrínseca de acuíferos (versión original) y el propuesto Método La Plata (MLP) para la sensibilidad hidrológica superficial. Este último utiliza la asignación de valores numéricos basados en geoformas presentes (positivas y negativas), porcentaje de pendiente topográfica y estacionalidad del régimen hídrico, con una escala complejiva de rangos de cero a uno. El factor de Sensibilidad Superficial surge de promediar de los tres indicadores y permite calificarla en cinco categorías, entre los niveles de bajo a extremo. Para llegar a establecerla globalmente para los arcos terrestres subterráneo y superficial (carta geoambiental), se propone el cotejo de los valores GOD con los del método MLP con el empleo de la herramienta GIS, a partir de la superposición matemática de dos capas Raster (álgebra de mapas) en cada píxel de la carta. Además de la expresión cartográfica, pueden utilizarse las tablas de atributos para estimar pasivos ambientales en suelos y aguas, infraestructura existente y radicación de nuevas instalaciones y perforaciones. Se utilizó el programa ArcMap 9.1, por la facilidad que el sistema ofrece para la permanente actualización quasi automática de la cartografía temática. Se presenta como ejemplo la carta correspondiente a Cerro Dragón para la posición inicial 2007.

Palabras clave: cuenca Golfo San Jorge, GIS, Patagonia extrandina, sensibilidad hidrológica, vulnerabilidad de acuíferos

A method for estimation of hydrological sensitivity applied in Golfo San Jorge basin. Province of Chubut. Argentina

ABSTRACT

A method developed and used in an area of Chubut Province is described. The object of the method is to determine the underground and surficial hydrological sensitivity in order to select the site of petroleum facilities with the least possible environmental hydric risk. It is based on the conjunction of the GOD method used to assess the intrinsic aquifer vulnerability (original version) and the proposed La Plata Method (MLP) for the surficial hydrological sensitivity. The latter method assigns numerical values based on landforms (positive and negative), slope percent and seasonality of the water regime, using a complexive range scale from zero to one. The Surficial Sensitivity factor results from the average of the three indicators and includes five categories, from low to extreme values. For a global coverage in the underground and surficial terrestrial arches (geoenvironmental map) it is proposed to compare the GOD values with those of the MLP method using a GIS, through the mathematical overlapping of two raster layers (map algebra) in each map pixel. In addition to the cartographic display, attribute tables can be used to estimate the environmental pollution in soils and waters, existing infrastructure and location of new facilities and drillings. The ArcMap 9.1 program was used due to its capacity for a permanent and quasi-automatic updating of thematic mapping. The map corresponding to Cerro for the initial position 2007 is presented as an example.

Key words: aquifer vulnerability, extra-Andean Patagonia, GIS, hydrological sensitivity, San Jorge Gulf Basin

Introducción

Si bien se dispone en la disciplina geohidrológica de una cantidad de métodos para calificar la vulnerabilidad intrínseca de acuíferos, en muchas ocasiones resultaba necesario hacerlo desde el punto de vista

geoambiental, teniendo en cuenta el estadio superficial del ciclo hidrológico desde una óptica fundamentalmente geomorfológica.

Esta condición resalta particularmente en las regiones bajo clima árido como la Patagonia extraandina de Argentina, caracterizadas por geoformas muy

Hernández, M. A. *et al.*, 2009. Un método para estimar la sensibilidad hidrológica aplicado... *Boletín Geológico y Minero*, 120 (4): 523-532

particulares asociadas a un régimen hídrico actual de carácter transitorio. Hasta el momento, las cartas geoambientales (IGME, 1988) están enfocadas por una parte a la peligrosidad geológica (deslizamientos, derrumbes, sismos, colapsabilidad de materiales) o al riesgo (por ejemplo, el riesgo de anegamiento).

Desde el año 2005 parte de los autores diseñaron un sistema sencillo para poder cartografiar la sensibilidad hidrológica atinente al arco terrestre superficial del ciclo hidrológico, que denominaron Método La Plata (MLP), asociable al conocido GOD de vulnerabilidad intrínseca que para los sistemas acuíferos propusieron Foster e Hirata (1988) en su versión original.

La oportunidad brindada por la Empresa Pan American Energy (PAE) por sus propias necesidades, para orientar con base científica la protección ambiental en los yacimientos petrolíferos, permitió la aplicación práctica directa en una comarca de unos 3.000 km² localizada en la zona de Cerro Dragón, provincia de Chubut, que da origen a esta contribución (Figura 1).

Actualmente el método integrador (GOD + MLP) de calificación geoambiental se está aplicando en otras áreas, estando en desarrollo una versión más avanzada que incluye la modelización de los posibles fenómenos actuantes con un enfoque netamente ecohidrológico, dentro de una Tesis de Maestría de la Universidad Nacional de La Plata (Argentina).

Materiales y métodos

La metodología utilizada parte de la base que la sen-



Figura 1. Ubicación de la zona de aplicación
Figure 1. Location of application zone

sibilidad hidrológica es una componente esencial de la sensibilidad geoambiental, ya que utiliza atributos emergentes del campo de las ciencias relacionadas, por ejemplo la geología física, hidrogeología, geomorfología, pedología, junto con otros procedentes de la hidrología básica, hidrología atmosférica y geohidrología. Es decir, atributos que van a caracterizar un **componente** (pertenecientes al medio físico) y una **componente dinámica** (pertenecientes al campo de la hidrología).

Atendiendo a la variabilidad de los fenómenos hidrológicos en función del tiempo a escala humana (en comparación con la de cambios en el medio físico), la metodología general es deductiva, basada en la convergencia de evidencias y sus cambios temporales, obteniendo resultados por sucesivas aproximaciones y utilizando como calibre el comportamiento real de los sucesos hidrológicos.

Procedió la información transferida de las Universidades Nacionales de La Plata y de la Patagonia San Juan Bosco, Servicio Geológico y Minero de Argentina SEGEMAR (hojas Escalante 4569-IV, Sarmiento 4569-III, El Pluma 4769-I y Colonia Las Heras 4769-II, cartas de Peligrosidad Geológica, Geomorfológica, litológica), Servicio Meteorológico Nacional SMN, Dirección de Minería de la Provincia del Chubut, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria INTA e Instituto Geográfico Militar IGM (cartas altiplanimétricas).

La cartografía básica digital así como los mapas temáticos se construyeron sobre la plataforma de un Sistema de Información Geográfica (SIG) que permitió compatibilizar los Datum locales y no ofreció dificultad alguna para manejar información a diferentes escalas, pese a lo cual se utilizó la de digitalización 1:100.000 por ser la de más adecuado detalle entre ellas para una región muy vasta. Con el código ArcGis se guardó la información geográfica en los formatos de modelo vectorial y el raster. Se utilizó el formato de ESRI Grid para la representación del Modelo de Elevación Digital del Terreno (DEM), con celdas de 30m x 30m.

La elaboración preliminar de antecedentes permitió percibir, en función de la cartografía básica y el SIG utilizable, los sectores parciales donde procurar información adicional para mantener una densidad lo más homogénea posible, seleccionar la leyenda y escalas parciales más adecuadas.

Se condujo la tipificación hidrometeorológica y climática con datos de la estación SMN Comodoro Rivadavia Aero y record compuesto para el lapso 1921-2000, con suficiente extensión, garantía y representatividad. Se utilizaron datos de precipitación pluvial, temperatura, vientos (cuadrante y velocidad),

Hernández, M. A. et al., 2009. Un método para estimar la sensibilidad hidrológica aplicado... *Boletín Geológico y Minero*, 120 (4): 523-532

heliofanía, humedad relativa, presión barométrica. Fue calculada la evapotranspiración potencial y real con los métodos de Thornthwaite-Mather y Penman, el primero utilizado también para resolver el balance hídrico local (forzosamente deficitario) y la clasificación climática.

Los mapas geomorfológico, geológico y de suelos elaborados en base a los antecedentes fueron corroborados y/o completados en el campo, simultáneamente con la operación de medición de niveles de agua subterránea en la red freática construida y acotada por Pan American Energy, para transformarlos en alturas potenciométricas y trazar el mapa equipotencial, referido a la componente freática del sistema geohidrológico reconocido.

Se confeccionó también un mapa de rangos de pendiente topográfica, obtenidos por métodos estadísticos a partir de las cartas altiplanométricas, generándose categorías de pendientes menores a 0.1 %, 0.1-0.5%, 0.5-1%, 1-10%, 10-15%, 15-20%, 20-30 % y mayores al 30%.

Sobre la elaboración equipotencial se demarcaron a su vez y en función de las curvas y filetes de flujo, las zonas de recarga, circulación y descarga, midieron los gradientes hídricos y calcularon las velocidades efectivas de flujo. Estas últimas, con datos de coeficiente de permeabilidad obtenidos por ensayos de inyección de agua o del tipo Slug Test, únicos practicables en los acuíferos pobres locales, y porosidad eficaz a partir de la granometría.

Dentro de la amplia oferta de métodos para determinar vulnerabilidad intrínseca de acuíferos (GOD, DRASTIC, SINTACS, EPIKS, Ekv, BRG y otros) el primero propuesto por Foster e Hirata (1988) es el más adecuado por su simplicidad y adecuación al tamaño del área y nivel de información disponible. Utiliza como atributos de ingreso el tipo de acuífero, litología de la Zona No-Saturada (cobertura) y profundidad del agua subterránea. Utilizando grillas propuestas en base a los parciales cuantitativos de los indicadores mencionados, se llegan a determinar Índices para calificar la vulnerabilidad dentro de cinco categorías básicas o las que resulten de su mayor discretización.

Para la sensibilidad superficial, el método MLP utiliza como elementos básicos los mapas geomorfológicos, de categoría de pendientes, de parámetros morfométricos (no empleados en este caso por razones de escala), geológicos y/o geotécnicos, y red hidrográfica, para ingresar en un sistema de tres grillas concurrentes similar al que se ofrece en el método de vulnerabilidad intrínseca GOD.

La sensibilidad ambiental del medio físico tanto superficial como subterráneo se expresa en la carta de geosensibilidad hidrológica o carta geoambiental,

reuniendo ambas metodologías, especialmente enfocada al fenómeno hidrológico y teniendo en cuenta la afectación que una actividad humana pudiera introducir en el medio.

Corresponde al dominio de la disciplina científica Ecohidrología, en tanto suministra elementos objetivos para analizar la ocurrencia de efectos negativos o advertir la capacidad natural para atenuarlos. Para llegar a esta carta síntesis se recurre a las bondades de la herramienta SIG, mediante la superposición de las capas correspondientes al mapa de vulnerabilidad acuífera y el de sensibilidad ambiental superficial. Resulta entonces una carta síntesis con localización de sectores espaciales con diferente sensibilidad ambiental, por sumatoria algebraica de efectos negativos.

Características del área

Los umbrales de riesgo físico o hidrológico son altamente dependientes de las condiciones climáticas, por ejemplo ante ocurrencia de lluvias extraordinarias y sus consecuencias en un paisaje en equilibrio con un régimen árido, o la permanencia de heladas en relación a la oportunidad de recarga de acuíferos (recarga diferida), con la consecuente dilución de solutos contaminantes.

El **clima local** es de tipo árido, mesotermal con nulo exceso de agua y concentración estival de la eficiencia térmica según la calificación de Thornthwaite y Mather (1955). Alcanza la **lluvia** media anual a 228 mm, concentrada en el semestre frío y con génesis pacífica (anticiclón del Pacífico Sur), reconociendo una tendencia decenal ascendente desde 1951 y mostrando un déficit hídrico del orden de los 499 mm/año. Está sometida la comarca a vientos persistentes de los cuadrantes Oeste (Oeste, Noroeste y Sudoeste), más intensos en la estación estival, con velocidades medias superiores a los 30 km/h. La **temperatura** media anual es de 12.7 °C, con extremos medios de 6.6 en Julio y 19.1 °C en Enero.

Está caracterizado el **paisaje** por el predominio de niveles escalonados de terrazas estructurales (Niveles Gradacionales Terrazados) con cobertura grábrica, descendentes en sentido W-E y denominados localmente "pampas". Se hallan disectados por cañadones de régimen transitorio-efímero, relicto de antiguas vías de drenaje en un paleoclima más húmedo. Sobresale el paisaje asociado al valle del río Chico, con su relativamente amplia planicie aluvial, terraza fluvial y pedimentos de flanco. Otras geofor-mas son las superficies pedimentarias, bajadas, planicies aluviales de cursos menores y planicies margi-

Hernández, M. A. et al., 2009. Un metodo para estimar la sensibilidad hidrológica aplicado... *Boletín Geológico y Minero*, 120 (4): 523-532

nales de lago, abanicos aluviales, médanos debastados, depresiones endorreicas y terrazas lávicas, que contribuyen al modelado predominantemente subhorizontal.

Los **suelos** son de baja capacidad utilitaria y aptitud pastoril de poca receptividad. Pertenecen en general a los órdenes *Aridisol* (sub-orden *Argides*) y *Entisol* (sub-órdenes *Ortets* y *Psamentes*). La **vegetación** asociada es xerófila, con diversas especializaciones conservativas de agua, como suculencia, afilia, presencia de espinas y pelos, floris efímera y otras, que reducen al máximo las pérdidas consuntivas (Hernández, 2005). El porcentaje de cobertura no supera en general el 50%.

No existen rasgos **hidrológicos superficiales** perennes en la zona. Varios cañadones efímeros concurren al valle del río Chico y valle Hermoso, reproduciendo una antigua red integrada bajo un patrón dendrítico, al igual que los descendentes de Pampa del Castillo y Meseta Espinosa hacia el océano. El lago Colhue Huapi es marginal al área específica, además de reconocerse muchos bajos transitorios contenidos en las mesetas, de origen estructural, eólico o mixto.

Respecto a la **geología**, afloran prácticamente todos los terrenos terciarios desde el Paleoceno inferior (Malumian 1999), incluyendo formaciones continentales y marinas como las denominadas *Salamanca*, *Río Chico*, *Sarmiento*, *Patagonia* o *Chenque* y *Santa Cruz*. Superficialmente dominan los depósitos de gravas pliocenas ("rodados patagónicos") por sobre los de areniscas, arcillas, tobas, tobas calcáreas, margas, sedimentos organógenos y materiales aluvionales, sin dejar de mencionar rocas volcánicas e intrusivas básicas, depósitos eólicos y coluviales. Su secuencia vertical condiciona la ocurrencia de los poco frecuentes términos acuíferos.

Corresponde el **sistema acuífero** al denominado por Griznik "Complejo multiunitario" (en Griznik y Fronza 1996), compuesto para esta región por un término activo o Sistema Geohidrológico Superior SGS (acuífero freático + acuífero *Fm. Patagonia* + acuífero *Fm. Sarta Cruz*) y otro pasivo a semi-activo, Sistema Geohidrológico Inferior (SGI), contenido en la *Fm. Salamanca* y *Grupo Chubut* dentro del medio poroso, y en sectores en el *Grupo Bahía Laura* que se comportan como acuífero fisurado. El SGS incluye a la Zona No Saturada, con espesores que van desde 1 m a poco más de 20 m.

El sentido general del flujo subterráneo para el término activo está orientado desde las divisorias de agua superficial y esencialmente las mesetas, hacia los cañadones y posiciones bajas del relieve, sin que ello signifique un carácter ganador de los álveos transitorios.

Desde el punto de vista regional, la dirección predominante es hacia el Este en busca de la descarga terminal en el océano. Para la cuantificación hidrodinámica se practicaron ensayos de infiltrometría (dispositivo de Kamenskii) y ensayos slug para estimación de la permeabilidad (resoluciones de Hvorslev y de Brown-Rice), estos últimos si bien elementales, únicos factibles ante los exiguos caudales disponibles.

Desarrollo

Para poder elaborar el producto final (carta de geosensibilidad hidrológica), se construyeron mediante el GIS como se mencionó en el ítem Metodología, la red de drenaje y mapas de unidades geomorfológicas, geológicas, isoprofundidad de nivel freático y equipotencial. Como se anticipara, la carta de geosensibilidad hidrológica surge de la confluencia entre las de vulnerabilidad intrínseca y sensibilidad hidrológica superficial.

El método GOD (Foster e Hirata, 1988) es el utilizado para la cartografía mostrada en la Figura 2, donde como puede notarse predomina arealmente una vulnerabilidad intrínseca moderada, en coincidencia con las unidades geomorfológicas NGT, terraza estructural y sectores más elevados de las superficies pedimentadas y los valles de cañadones. La baja ocurre en pedimentos, interfluvios de cañadones y médano, mientras que la alta se da en los valles del Zanjón Valle Hermoso, río Chico, terraza fluvial sectores medios a bajos de los valles de cañadones, abanicos aluviales y bajos endorreicos, con puntal presencia de un rango extremo sin ocupación territorial.

En general, surge el dominio del factor profundidad del agua en los resultados, por sobre el tipo litológico de la ZNS y menor participación de la ocurrencia, por tratarse el objeto en todos los casos de un acuífero libre, más o menos cubierto.

Para la sensibilidad superficial, el MLP utiliza una grilla conformada por rangos de valores cuantitativos adimensionales para tres factores de calificación: geoformas, categorías de pendiente, régimen hídrico superficial.

- **Geoformas:** Para esta entrada se consideran en este caso específico intervalos de 0.3 - 0.4: NGT, Planicie estructural lávica, Médanos (+), de 0.4 - 0.5 Pedimento (+), de 0.5 - 0.6 Bajada (+) y Bajos endorreicos (-), de 0.6 - 0.7 Terraza fluvial (+), de 0.7 - 0.8 Abanicos aluviales, coluvios (+), de 0.8 - 0.9 Valles, Planicie marginal (-) y de 0.9 - 1.0 Planicie aluvial.
- **Categorías de pendiente:** Los rangos están valorados

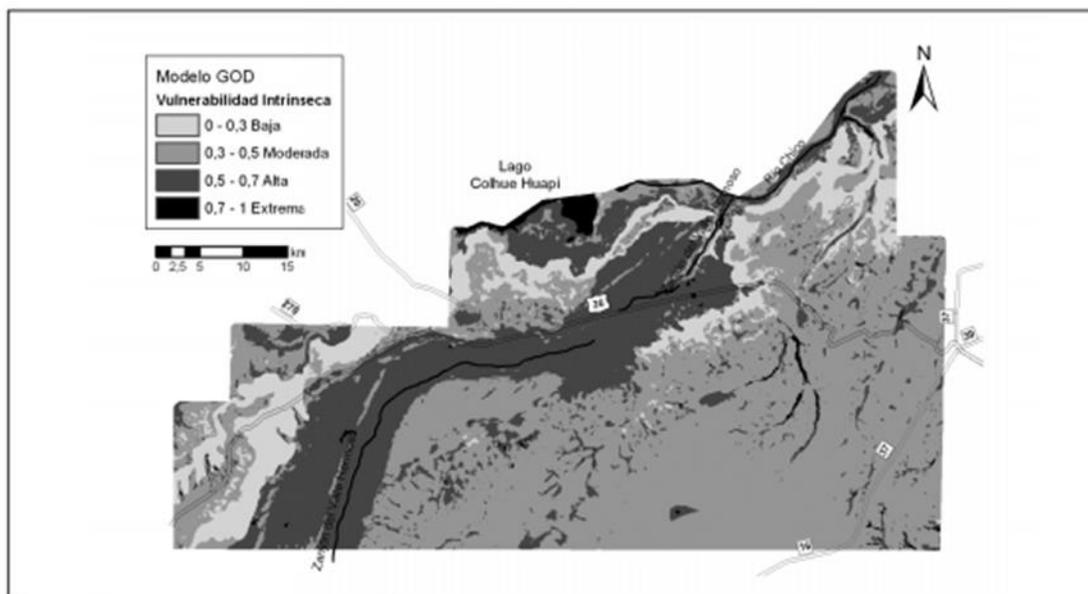
Hernández, M. A. et al., 2009. Un metodo para estimar la sensibilidad hidrológica aplicado... *Boletín Geológico y Minero*, 120 (4): 523-532

Figura 2. Mapa de vulnerabilidad intrínseca GOD
 Figure 2. Map of intrinsic vulnerability GOD

dos entre 0 y 0.3 para pendientes de 0% a 0.1%, entre 0.3 y 0.4 para 0.1 a 0.5%, 0.4 y 0.5 para 0.5% a 1%, 0.5 y 0.6 para 1% a 10%, 0.6 y 0.7 para 10% a 15%, 0.7 y 0.8 para 15% a 20%, 0.8 y 0.9 para 20% a 30% y 0.9 y 1.0 para mayores al 30%.

- *Régimen hídrico superficial*: Se plantean los escalones de valores para un régimen netamente efímero (0-1 día) y transitoriedad desde 1 día a 11 meses (0.3 a 0.9) con el extremo en el régimen perenne según la escala atributiva mostrada en la Tabla 1.

La calificación final que sintetiza la sensibilidad hidrológica superficial surge del promedio de las individuales para cada factor, no de su producto como ocurre con el caso del GOC, porque fundamentalmente, las tres componentes son concurrentes y con un buen grado de interrelación, por ejemplo con el régimen de un curso y la pendiente, con la pendiente y la geoforma continente o con el régimen y las características de la geoforma, en el caso de lagos, curso de agua sin planicie aluvial destacada o con ella. En el GOD y también como ejemplos, el carácter libre o semiconfinado del acuífero no es directamente vinculable con la profundidad del nivel de agua, o esta con la litología de la ZNS. Si se trabajara con productos se

obtendrían en la práctica calificaciones muy bajas para la realidad del medio hídrico, además de no poder abstraerse las interrelaciones con el consiguiente defecto de las dobles ponderaciones de un mismo factor.

En la Figura 3 se ofrece el mapa con la calificación de la sensibilidad superficial. Las zonas de baja sensibilidad coinciden con los NGT (Pampa del Castillo) de mayor altura relativa, Terraza estructural lávica y las porciones proximales de los Pedimentos sobre ambas márgenes del río Chico, más expandidas sobre la derecha.

Dentro de los NGT se hallan también partes insulares de baja sensibilidad coincidentes con resaltes positivos del relieve, aún con pendiente exigua. Son éstas las particularidades favorables que el paisaje ofrece al método, en comparación con los exclusivamente cualitativos.

La sensibilidad hidrológica superficial media predomina arealmente, incluyendo gran parte del Pedimento y su bajada, los Niveles Gradacionales Terrazados de nivel intermedio y bajo, la Terraza fluvial y Abanicos aluviales. Además, se incluyen algunas zonas de cañadones que disectan los NGT sus nacientes, antes de adquirir un valor de pendiente

Hernández, M. A. *et al.*, 2009. Un metodo para estimar la sensibilidad hidrológica aplicado... *Boletín Geológico y Minero*, 120 (4): 523-532

A		B	C	RANGO DE VALORES	SENSIBILIDAD SUPERFICIAL $\Delta s = \frac{A + B + C}{3}$
GEOFORMAS		PENDIENTES	RÉGIMEN HÍDRICO (estacionalidad)		
Positivas	Negativas	%	Cuerpos de agua, mallines, cursos de agua		
		0	0 día	0	BAJO
		0,1	1 día	0,3	
Nivel Gradacional Terrazado					MEDIO
Planicie Estructural Lávica					
Médanos		0,5	7 días	0,4	
Pedimento		1	15 días	0,5	ALTO
Bajada	Bajos Endorreicos	10	1 mes	0,6	
Terraza Fluvial		15	4 meses	0,7	MUY ALTO
Abanico Aluvial Coluvios		20	8 meses	0,8	
	Valles Planicie Marginal (lacustre)	30	11 meses	0,9	EXTREMO
	Planicie Aluvial	>30	Perenne	1	

Tabla 1. Tabla de atributos MLP
 Tabla 1. Table of MLP attributes

significativo. Con calificación alta aparecen las geoformas negativas: planicies aluvial y marginal, en las pendientes inferiores de los cañadones y la mayor parte de los bajos endorreicos incluyendo algunos menores yacientes en valles y planicies.

En el caso concreto del sector analizado, faltan sectores con sensibilidad extrema por no coincidir elevadas pendientes en cuerpos de agua con un régimen permanente y geoformas de mayor riesgo.

En la crítica inicial se hizo alusión a la carencia de metodologías apropiadas para calificar (cuantitativa o semicuantitativamente) la sensibilidad hidrológica superficial y lógicamente, cuando se intenta luego involucrar a todo el arco terrestre del ciclo hidrológico. Hasta la aparición de los SIG y habiéndose desarrollado en el interin la metodología para la vulnerabilidad de acuíferos, no fue accesible este propósito. La carta geoambiental que se presenta en la Figura

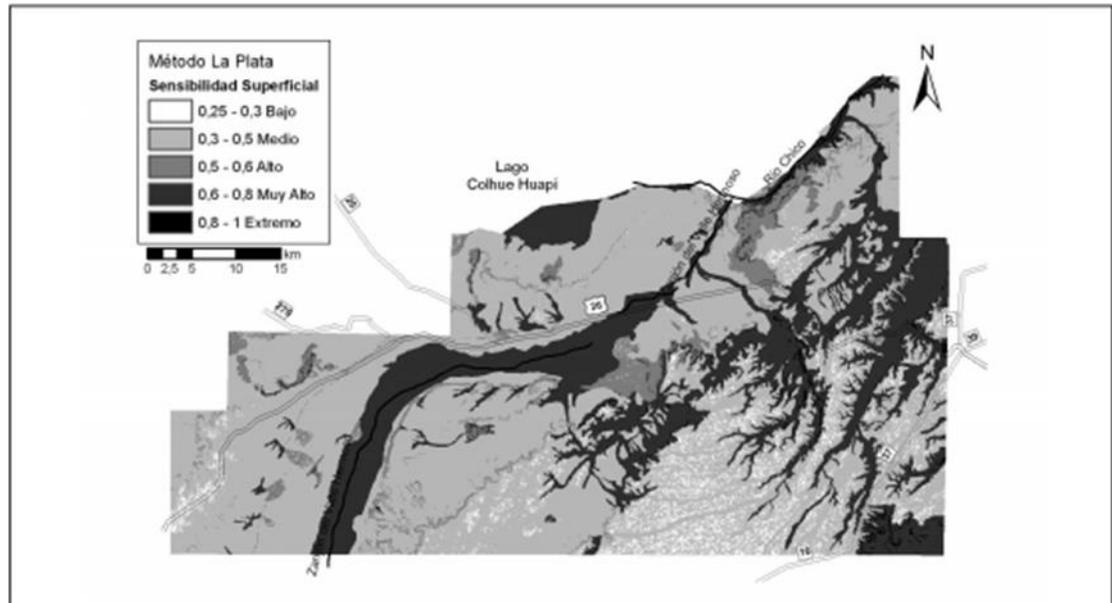


Figura 3. Mapa de sensibilidad hidrológica superficial
 Figure 3. Map of superficial hydrological sensibility

4 fue realizada en el marco del Sistema de Información Geográfica, a partir de la superposición matemática de dos capas raster: una de ellas representando la Vulnerabilidad intrínseca del acuífero establecida por el método GOD y la restante valorando la Sensibilidad Hidrológica Superficial. Esta operación, conocida habitualmente como álgebra de mapas, consistió en el promedio de ambos valores en cada píxel del mapa y por ende los valores resultantes están comprendidos entre 0 y 1.

Tanto para esta carta como para las dos anteriores es necesario aclarar que utilizan en la realidad del método claves de colores y tonos que facilitan grandemente la apreciación, situación no alcanzada en este caso al tener que recurrir a tramas en blanco-negro. Tal la situación de la menor sensibilidad ambiental en las geofomas positivas más resaltantes y una disminución tonal hacia las menos conspicuas, para ingresar gradualmente a términos de sensibilidad más alta atendiendo a condicionantes de los dos medios.

Un ejemplo se ofrece en el valle Hermoso y terraza fluvia adosada donde se estaría en presencia de un ambiente presumiblemente homogéneo en términos relativos, pero en realidad con importantes dife-

rencias geoambientales desde el punto de vista hidrológico.

Otro está representado por las diferencias marcadas en las unidades de Pedimento, donde según la coalescencia de vulnerabilidades de acuífero y sensibilidad superficial surgen distintos grados de sensibilidad ambiental, no apreciables de modo individual.

De acuerdo a las características físicas (especialmente las de índole hidrológica) de cada comarca en particular, puede optarse por utilizar otra asignación ponderada, como en algunos casos tratados por los autores donde los atributos emergentes del sistema que se utilizara para calificar la vulnerabilidad fueron pesados con otra proporción respecto al MLP y consecuentemente reflejados con resolución distinta en la carta de sensibilidad geoambiental.

También se cree necesario destacar que el empleo de la herramienta SIG permite una permanente actualización, no solamente en el mapa de vulnerabilidad intrínseca por variaciones en la profundidad de los niveles de agua subterránea, sino ante cambios en los rasgos morfológicos que ocurren frecuentemente en las regiones áridas ante eventos extremos.

En el caso de Pan American Energy, la ampliación de la red freaticométrica y paulatina incorporación de

Hernández, M. A. *et al.*, 2009. Un metodo para estimar la sensibilidad hidrológica aplicado... *Boletín Geológico y Minero*, 120 (4): 523-532

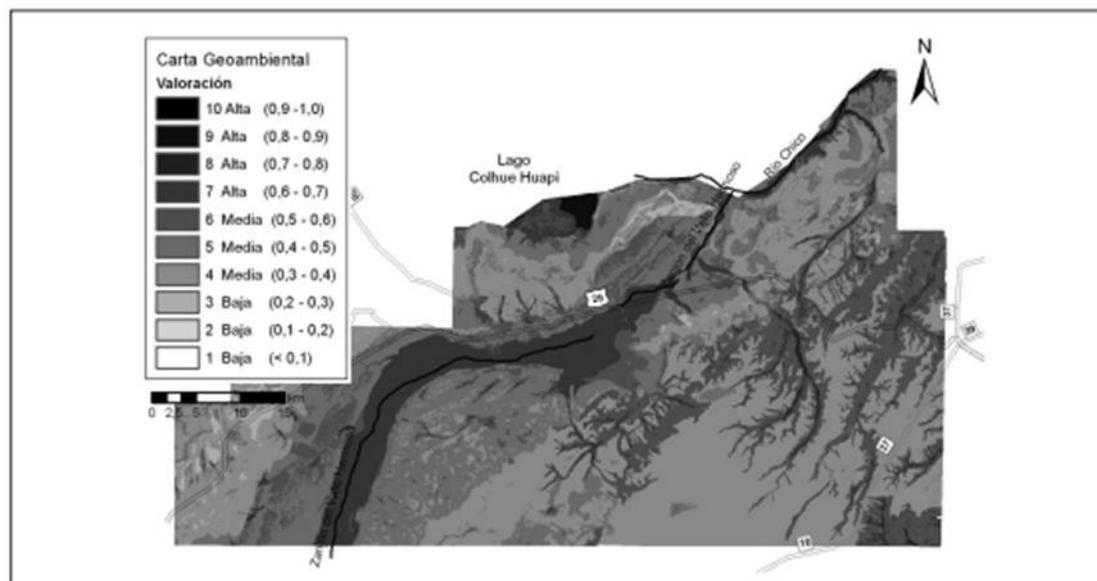


Figura 4. Carta de sensibilidad geoambiental
Figure 4. Map of geoenvironmental sensibility

nueva información geológica, da lugar a la optimización permanente de la carta y la toma de decisiones oportunas respecto a la protección ambiental.

Conclusiones

La ocurrencia de la fase terrestre del ciclo hidrológico (superficial y subterránea) en regiones áridas ofrece particularidades que hacen necesario establecer la sensibilidad del medio desde el punto de vista hidrológico, por ejemplo para evitar o minimizar los riesgos ambientales en la actividad petrolífera.

Si bien los métodos para percibir la vulnerabilidad intrínseca, como el GOD aquí empleado, cubren el propósito en el medio subterráneo, los antecedentes para el ámbito superficial no atienden específicamente a los sucesos hidrológicos en paisajes áridos.

Se plantea en el trabajo un sencillo método denominado La Plata (MLP), partiendo de la base que la sensibilidad hidrológica es componente esencial de la sensibilidad geoambiental, por utilizar atributos del campo de las ciencias relacionadas (geología física, hidrogeología, geomorfología, pedología) junto con otros procedentes de la hidrología básica, hidrología atmosférica y geohidrología.

El empleo de un Sistema de Información Geográfica permitió, además de generar una cartografía básica adecuada y superponer los layer fundamentales para estimar el riesgo superficial (geoforma, categorías de pendientes, régimen hídrico), compatibilizar las metodologías GOD y MLP para generar una carta de sensibilidad geoambiental mediante algebra de mapas.

Para la correcta aplicación de la metodología, probada en yacimientos de la provincia de Chubut, se requiere un muy buen conocimiento del medio físico y de los procesos hidrológicos, además de contar con una suficientemente densa red de observación hidrométrica destinada a actualizar y mejorar la carta recurriendo a las ventajas operativas del SIG.

El producto resulta de utilidad para orientar las radicaciones de la actividad petrolífera (perforaciones, ductos, baterías, plantas) hacia sitios de menor sensibilidad, optimizar la infraestructura existente y valuar posibles pasivos ambientales.

Referencias

Foster, S. e Hirata, R. 1988. Determinación del riesgo de contaminación de aguas subterráneas. *Centro Panam. de Ing. Sanit y Cs. del Ambiente. CEPIS. Lima.*

Hernández, M. A. *et al.*, 2009. Un metodo para estimar la sensibilidad hidrológica aplicado... *Boletín Geológico y Minero*, 120 (4): 523-532

Griznik, M. y Fronza, S. 1996. Hidrogeología de la región situada al Noreste de Las Heras, Provincia de Santa Cruz, Argentina. *XIII Congreso Geológico Argentino y III Congreso de Exploración de Hidrocarburos*, Actas IV: 417-425. Buenos Aires.

Hernández, M. 2005. Mecanismos de recarga de acuíferos en regiones áridas (Síntesis). *Actas II Seminario Hispano Latinoamericano sobre Temas Actuales de la Hidrología Subterránea*, 249-254. Río Cuarto.

IGME 1988. Riesgos geológicos. *IGME. Serie Geología Ambiental*. Madrid.

Malumian, N., 1999. La sedimentación y el volcanismo terciarios en la Patagonia extraandina. En: Caminos, R (Ed.), *Geología Argentina*. Anales del Instituto de Geología y Recursos Minerales, Buenos Aires, pp. 557-612.

Thorntwaite, C. W. y Mather, J. R. 1955. The water balance. *Publ. Climatol. Lab. Climatol. Drexel Inst. Technol.* 8, 1-104.

Recibido: junio 2009

Revisado: agosto 2009

Aceptado: agosto 2009

Publicado: diciembre 2009