

EVALUACIÓN DEL RIESGO POTENCIAL DE CONTAMINACIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN LA CUENCA DEL ARROYO YAGUARÓN

EVALUATION OF THE POTENTIAL RISK OF CONTAMINATION OF GROUNDWATER IN THE YAGUARÓN STREAM BASIN

SONIA MABEL MOLINAS¹

¹Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad Nacional de Asunción, Campus Universitario, San Lorenzo, Paraguay. E-mail: geosoniamolinas785@gmail.com

Resumen: La cuenca hidrográfica del Arroyo Yaguarón, forma parte de las trece cuencas de aguas superficiales del Acuífero Patiño. Este acuífero es la principal fuente de abastecimiento de agua potable para el consumo humano en el área y sobre él, se desarrollan actividades que constituyen fuentes potenciales para la contaminación del recurso, y que podrían afectar la calidad de las aguas subterráneas; por ello este trabajo se llevó a cabo para determinar los riesgos potenciales de contaminación mediante el análisis de la vulnerabilidad de contaminación por el método GOD y la indexación de la textura del suelo debido a la importancia de la capa de suelo como protección de las aguas subterráneas. La aplicación del método GOD-S y su complementación con el método POSH permitió clasificar las cargas contaminantes y representar las zonas de riesgos potenciales a la contaminación con ayuda de las herramientas del sistema de información geográfica.

Palabras claves: *Acuífero Patiño, agua subterránea, vulnerabilidad, riesgos potenciales de contaminación.*

Abstrac: The hydrographic basin of the Yaguarón stream, is part of the thirteen surface water basins of the Patiño Aquifer. This aquifer is the main source of drinking water supply for human consumption in the area and on it, activities are developed that are potential sources for the contamination of the resource, and that could affect the quality of groundwater; therefore, this work was carried out to determine the potential risks of contamination through the analysis of the contamination vulnerability by the GOD method and the indexation of the soil texture due to the importance of the soil layer as protection of groundwater. The application of the GOD-S method and its complementation with the POSH method allowed to classify the polluting loads and represent the zones of potential risks to contamination with the help of the tools of the geographic information system.

Key words: *Patiño Aquifer, groundwater, vulnerability, risk of contamination.*

INTRODUCCIÓN

El área que abarca el acuífero Patiño, está conformada por trece Cuencas Hidrográficas de la que incluye una parte el área de investigación; la Cuenca Hidrográfica del arroyo Yaguarón localizada en la Región Oriental del Paraguay, en el departamento de Paraguarí englobando los distritos de Yaguarón y Pirayú.

En la zona de estudio, el 78 % de la población urbana se abastece de las aguas subterráneas que son utilizadas principalmente para la provisión de agua potable, actividades industriales y agropecuarias, el principal problema sobre este recurso es el incremento en la contaminación debido a la falta de saneamiento in situ y a las fosas sépticas mal construidas (DGEEC, 2002).

A menudo estas actividades representan amenazas o riesgos que pueden afectar a la calidad del agua subterránea es por esto que la adopción de una serie de medidas de control de la contaminación claramente enfocadas y bien afinadas puede resultar en grandes beneficios.

Báez, *et al.* (2014) menciona al respecto que el Acuífero Patiño presentan zonas con moderado y alto grado de contaminación, y que del 42% del acuífero tiene una mediana a alta vulnerabilidad (60 a 100).

Por otro lado, los Distritos de Yaguarón y Pirayú no han adoptado acción significativa para asegurar la calidad natural del agua ni han realizado esfuerzos adecuados para evaluar los riesgos de contaminación del agua subterránea.

Bajo este hecho se consideró importante realizar este trabajo con el fin de dar información a las Juntas de Saneamiento, aguateras e instituciones estatales y privadas de la vulnerabilidad y los riesgos que se encontrarían expuesto el acuífero para garantizar la calidad de agua proveída a los usuarios.

Para preservar la calidad del agua es necesario realizar estudios sobre la vulnerabilidad y los riesgos de contaminación del agua subterránea. La vulnerabilidad estaría dada por las características intrínsecas de un acuífero, que lo hacen más o menos sensible a ser adversamente afectado por una carga contaminante (Foster & Hirata, 1991).

Existen diferentes metodologías para la cualificación y mapeo de la vulnerabilidad del agua subterránea, entre las que los más usados en América Latina y el Caribe son el DRASTIC, que es un modelo empírico desarrollado por Aller *et al.* (1987) y GOD desarrollado por Foster en 1987 (Kalaoum, 2016).

De acuerdo con Hirata (1994), método GOD se basa en los siguientes parámetros: **G**: (*Ground water occurrence*) el grado de Confinamiento del agua subterránea; **O**: (*overall aquifer class*) las características en términos litológicos y grado de consolidación, de los estratos por encima de la zona saturada y **D**: (*depth*) la profundidad del agua o del acuífero.

Los tres índices que se multiplican entre sí, resultan en uno final (diagrama de salida - output) que puede variar entre 1 (vulnerabilidad máxima) y 0 (mínima).

De acuerdo a Foster & Hirata (1991), el suelo cumple una función muy importante en el proceso de atenuación de contaminantes por la mayor cantidad de arcillas y materia orgánica, y una población bacteriana considerable contenida en ella, razón por la cual se consideró indexar el Factor S o textura de suelo en este trabajo y obtener la vulnerabilidad por el método GOD-S, Foster *et al.* (2002), y se hallará multiplicando los cuatro parámetros **G*O*D*S**.

Para Cardoso (2010), el riesgo de contaminación del agua subterránea depende de la relación de las características naturales de los estratos

que alejan el acuífero de la superficie terrestre (Vulnerabilidad a la contaminación) y de la carga contaminante.

Las fuentes de contaminación de aguas subterráneas son diversas, y se diferencian según el tipo de contaminante y la forma en que emiten dicha contaminación, de esta manera, Foster *et al.* (2001) citado en Hirata (2002), sugieren una clasificación de fuentes potencialmente contaminantes según el método **POSH** que considera:

El **Origen** de la actividad o del Contaminante (*Pollutant Origen*) y la **Carga Hidráulica** asociada (*Hydraulic Surchage*), inferida por la cantidad de agua utilizada o disponible. Estos autores hacen notar que es muy importante identificar aquellas actividades que generan una contaminación difusa y las que generan contaminación de tipo puntual. Esto es por la importancia que tiene su reconocimiento al momento de considerar las medidas de control (Hirata, 2002).

De esta manera el presente trabajo, pretende determinar los riesgos potenciales a la contaminación del acuífero en el área de la Cuenca Hidrográfica del arroyo Yaguarón analizando la vulnerabilidad del acuífero a la contaminación del acuífero en el área, utilizando el método GOD-S y determinar los niveles de cargas potenciales de contaminación del acuífero aplicando el método POSH para luego representar en mapas las zonas de vulnerabilidad y riesgos potenciales a la contaminación del agua subterránea en el área de la Cuenca Hidrográfica del arroyo Yaguarón.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El área de estudio corresponde a la Cuenca Hidrográfica del arroyo Yaguarón englobando los Distritos de Yaguarón y Pirayú del Departamento de Paraguari; abarcando una superficie de 6.192 hectáreas con 10.154 habitantes aproximadamente, así como se muestra en la Figura 1.

La investigación se desarrolló con base en una metodología Mixta-No experimental, transeccional/correlacional, las muestras fueron los pozos de abastecimiento de agua potable, la textura del

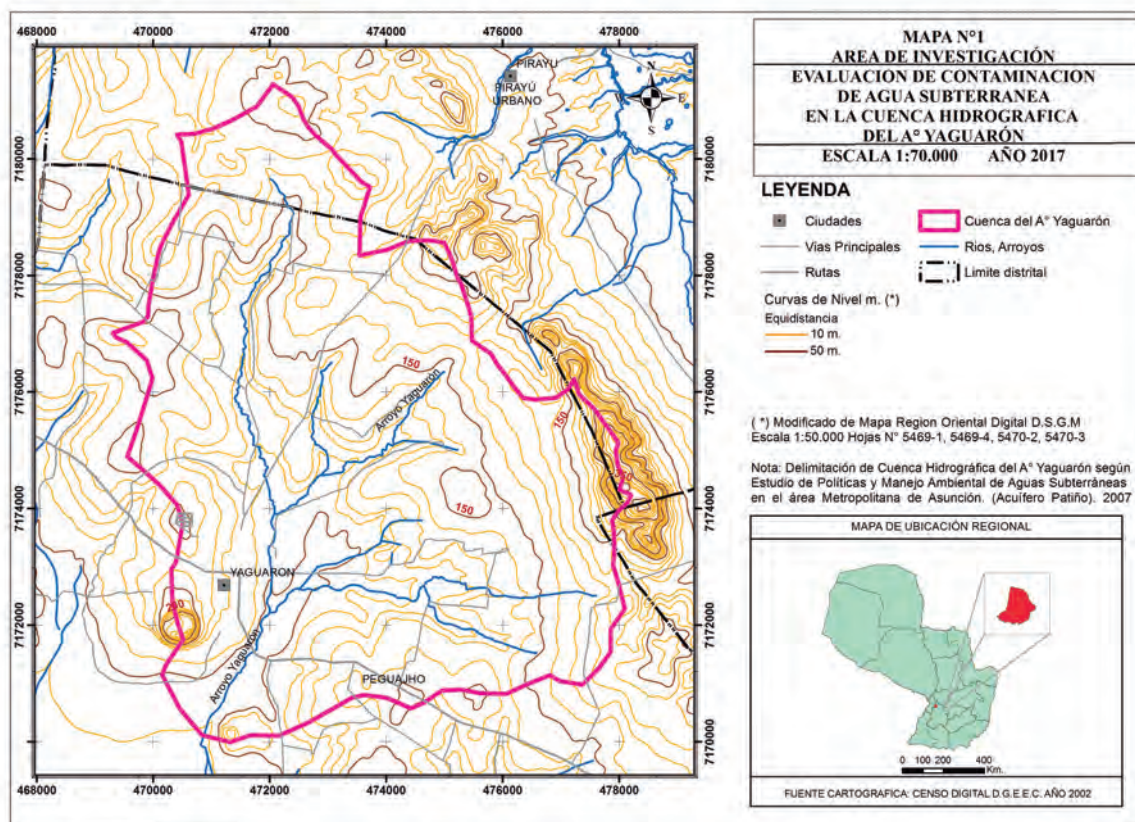


Figura 1. Mapa de Ubicación de la Cuenca Hidrográfica del Arroyo Yaguarón.

suelo y las fuentes de contaminación; el tipo de muestreo de suelo fue la intencional (Hernández *et al.*, 1998).

Esta metodología se desarrolló para establecer zonas prioritarias de protección del agua subterránea en función al mapeo de su riesgo a la contaminación. La cartografía base para el estudio se obtuvo de la Dirección del Servicio Geográfico Militar y la cartografía digital del Servicio Nacional de Saneamiento Ambiental. (2007). Esta metodología está compuesta, por el método GOD-S y el método POSH (Foster *et al.*, 2002).

Determinación de la Vulnerabilidad del acuífero mediante el método GOD-S

La evaluación de la vulnerabilidad del acuífero a la contaminación fue realizada conforme la metodología de indexación de parámetros GOD, Foster e Hirata, (1987), y la complementación con

el parámetro S (Foster *et al.* 2002) cuya sigla está conformada con las iniciales de los cuatro parámetros evaluados, como se describe a seguir:

El parámetro G, corresponde al tipo de ocurrencia del agua subterránea y varía en el intervalo de 0 a 1, y se obtuvieron de los perfiles litológicos de los pozos, en donde se describen la litología perforada, profundidad final, ubicación en coordenadas UTM, como otros datos disponibles principalmente en el Banco de Datos del Departamento de Recursos Hídricos dependiente del SENASA, las Juntas de Saneamientos y aguaterías privadas.

Para evaluar la litología de la zona no saturada o parámetro O, se utilizó la información de los perfiles estratigráficos de los 20 pozos ubicados en el área y utilizados para la evaluación del parámetro anterior, va de 0,4 a 1 y los clasifica en no consolidados (suelos residuales, sedimentos aluviales, arenas eólicas, arenas y gravas aluvia-

les y fluvio-glaciales y gravas coluviales), rocas porosas (arcillas, lutitas, limolitas, areniscas, tobas volcánicas, calizas blandas y calcarenitas) y rocas densas (rocas ígneas, metamórficas, lavas volcánicas, caliche y calizas karstificadas) Foster *et al.* (2002).

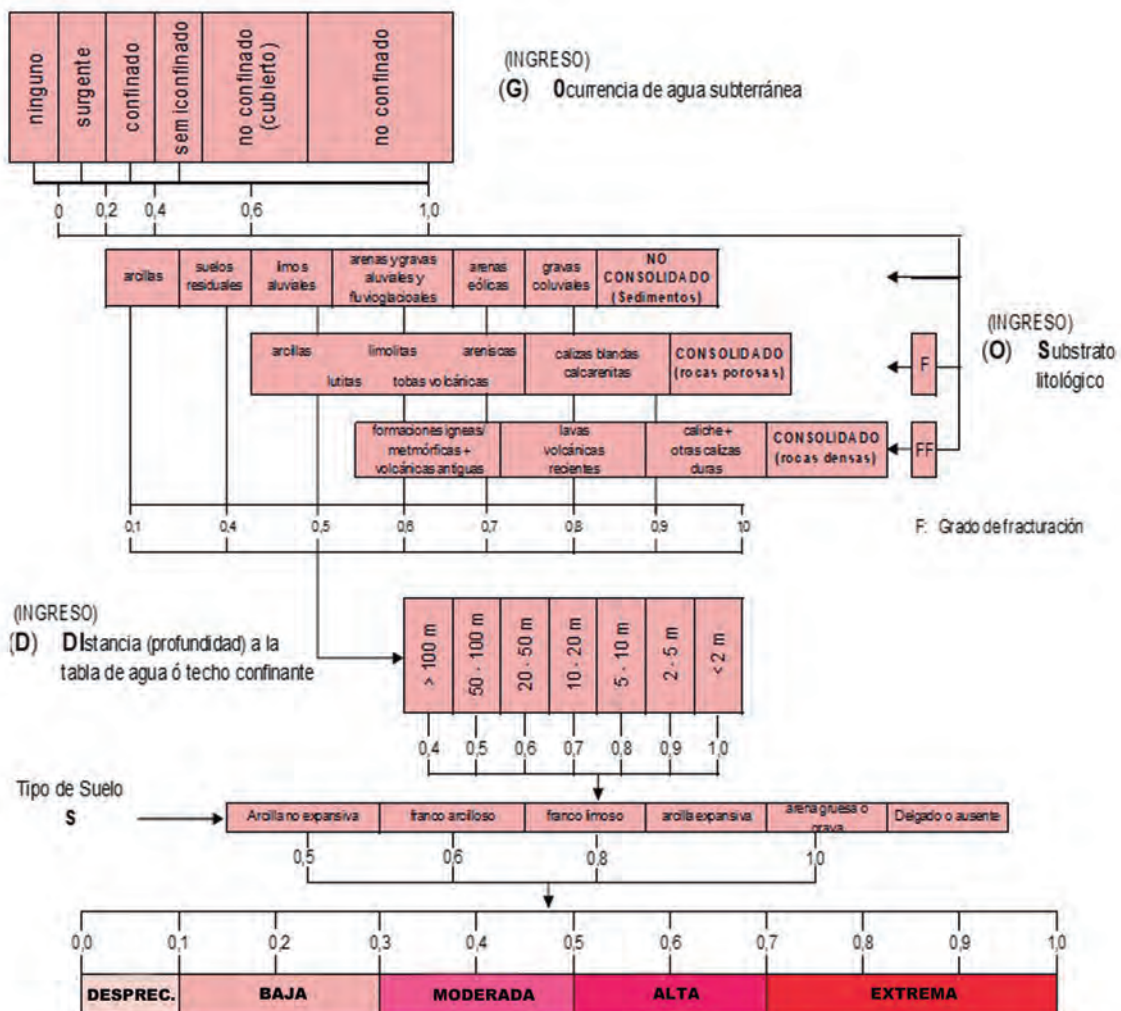
El parámetro D o distancia del agua presenta valores de 0,4 a 1 y corresponde a la variación de los acuíferos profundos a rasos respectivamente.

El parámetro S tiene en cuenta la forma de atenuación del contaminante y su eliminación de-

bido al contenido de materia orgánica y la textura del suelo que va de 0,5 a 1. La multiplicación de los cuatro parámetros obtenidos del análisis de las variables conforme a la ecuación 1 nos dio la vulnerabilidad del acuífero:

$$V=G*O*D*S$$

Dicho método permite clasificar a la vulnerabilidad en nula, despreciable, baja, media, alta y extrema, según la Figura 2 expresado en una escala de 0 a 1.



VULNERABILIDAD A LA CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS (Índice GODS) Fuente: Adaptado de Foster *et al.* (2002).

Figura 2. Método GOD-S para la evaluación de la vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos [Modificado de Foster *et al.* (2006), citado en Kalaum (2016)].

		Vulnerabilidad de Acuíferos		
		Bajo	Moderado	Alto
Carga Contaminante	Reducido	Bajo	Bajo	Moderado
	Intermedio	Moderado	Moderado	Alto
	Elevado	Alto	Alto	Alto

		Vulnerabilidad de Acuíferos		
		Bajo	Moderado	Alto
Carga Contaminante	Reducido	1	1	2
	Intermedio	2	2	3
	Elevado	3	3	3

Figura 3. Magnitud del riesgo potencial de Contaminación de aguas subterráneas que produce cada fuente.

Determinación de la Carga contaminante y el riesgo potencial de contaminación en la Cuenca Hidrográfica del Arroyo Yaguarón.

Se realizó el inventario de fuentes potencialmente contaminantes mediante la identificación, localización espacial y la caracterización sistemática de todas las fuentes asociadas con las diferentes actividades antropogénicas desarrolladas en el área de estudio, junto con la obtención de información sobre su evolución histórica donde fue apropiado y posible. Esta información sirvió de base para la evaluación de cuáles actividades tienen el mayor potencial de generación de cargas contaminantes peligrosas para el subsuelo.

El proceso de inventario fue hecho mediante el filtrado de información disponible en el Censo de Población y Viviendas del 2012, así mismo en las instituciones estatales como la Municipalidad de Yaguarón y Pirayú, también se recurrió en los estudios ambientales disponibles en la página web de la Secretaría del Ambiente. Además, se efectuaron verificaciones de campo para evaluar la veracidad de la información disponible y el georeferenciamiento de dichas actividades.

La caracterización de la carga contaminante se evaluó mediante el método POSH (*Pollutant Origin Surcharge Hydraulic*) creado por Foster & Hirata (1988) y revisado por Foster *et al.* (2002), traducido en la posibilidad de presencia de una sustancia contaminante del agua subterránea de acuerdo con el tipo de actividad y su sobrecarga hidráulica (*surcharge hydraulic*) que se estima sobre la base del uso del agua en la actividad

relacionada.

Teniendo en cuenta algunos datos de interés como densidad poblacional cobertura de tratamiento de residuos, estado del sistema de tratamiento aplicado, cantidad y tipo de productos químicos empleados, tipo de suelo, etc., este método permitió calificar las fuentes en este trabajo en Fuentes Tipo 3 o Elevado, Fuentes tipo 2 o moderado y Fuentes tipo 1 o Reducido. Una vez establecidos los niveles de generación de carga contaminante, se procedió a determinar el riesgo potencial generado para cada tipo de fuente. Para esto, se han relacionado mediante la superposición de los niveles de generación de carga contaminante, con la vulnerabilidad de las áreas en donde se ubica cada una de las Fuentes o Tipos de acuerdo a los resultados obtenidos con el método GOD-S. La relación de ambos factores se realizó de acuerdo a lo estipulado en la Figura 3.

Mapas de vulnerabilidad GOD-S

Los resultados obtenidos con el análisis de la vulnerabilidad de los acuíferos a la contaminación teniendo en cuenta los Factores G, O, D y S fueron representados en mapas a escala 1:70.000 con ayuda de la herramienta SIG. El método para interpretación de datos fue la interpolación IDW, (inverse distance weighted).

Mapas de zonas de riesgo potencial de contaminación

Primeramente se ubicaron las fuentes de contaminación sobre los mapas de Vulnerabilidad GOD-S

con ayuda de la herramienta SIG para obtener la magnitud de riesgo de cada tipo de fuente de contaminación y para delimitar las zonas de riesgo potencial a la contaminación se tuvo en cuenta las concentraciones espaciales de las Fuentes de contaminación en el área de investigación por km², es decir, más de dos fuentes de contaminación con magnitud de carga contaminante elevado en un km², generó zonas de riesgo alto. De esta manera también se procedió la delimitación de las zonas de riesgo moderado y bajo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Ubicación de los pozos de abastecimiento de agua potable en el área de investigación.

Tabla 1. Pozos de abastecimiento de agua potable en el área de la cuenca del Arroyo Yaguarón (Fuente: Banco de datos de SENASA-Aguatería Privada).

N°	Localidad	Distrito	Departamento	X	Y
1	Curupayty	Yaguarón	Paraguarí	472056	7170822
2	Itá Potrero	Yaguarón	Paraguarí	469903	7177251
3	Guarapí	Yaguarón	Paraguarí	474640	7171288
4	Guayaibity	Yaguarón	Paraguarí	474030	7178059
5	Zaguazú	Yaguarón	Paraguarí	470230	7176165
6	Tacuarindy - Guarapí	Yaguarón	Paraguarí	475268	7173430
7	Caraungá	Yaguarón	Paraguarí	470424	7173290
8	Pororo - Pirayú Calle	Yaguarón	Paraguarí	474486	7176359
9	Caaguy Poti	Pirayú	Paraguarí	470575	7179562
10	Yaguarón	Yaguarón	Paraguarí	471689	7172891
11	Yaguarón	Yaguarón	Paraguarí	471707	7173389
12	Yaguarón	Yaguarón	Paraguarí	470716	7172586
13	Yaguarón	Yaguarón	Paraguarí	470249	7172531
14	Centro de Salud	Yaguarón	Paraguarí	470906	7172366
15	Arrua'í	Itá	Central	476375	7173550
16	Cerro León	Pirayú	Paraguarí	478246	7172781
17	Iro de Mayo P1	Yaguarón	Paraguarí	471547	7173874
18	Iro de Mayo P2	Yaguarón	Paraguarí	471078	7173868
19	Cerro León	Pirayú	Paraguarí	478300	7172900
20	Mbaritú	Yaguarón	Paraguarí	469694	7174712

En la Tabla 1 se muestran los pozos que fueron analizados para realizar el trabajo de investigación, fueron estudiados 20 pozos de un total de 35 pozos inventariados. Las variables obtenidas fueron: Litología, nivel del agua, profundidad total en metros, coordenadas UTM X e Y.

Resultados de la aplicación del método GOD-S para la determinación de la vulnerabilidad en el área de investigación.

Se obtuvieron de las variables como tipo de Acuífero, tipo de litología perforada, profundidad del agua o nivel estático y los resultados del análisis textural del suelo.

Tabla 2. Vulnerabilidad por GOD.

N°	Localidad	Factor G	Factor O	Factor D	G*O*D	Vulnerabilidad GOD
1	Curupayty	1	0,7	1	0,7	Alta
2	Itá Potrero	0,6	0,7	0,6	0,252	Baja
3	Guarapí	0,6	0,7	0,6	0,252	Baja
4	Guayaibity	0,6	0,7	0,6	0,252	Baja
5	Zaguazú	0,6	0,7	0,6	0,252	Baja
6	Tacuarindy	1	0,7	0,8	0,56	Alta
7	Caraunguá	0,6	0,7	0,6	0,252	Baja
8	Pororo - Pirayú Calle	0,6	0,7	0,7	0,294	Baja
9	Caaguay Poti	0,6	0,7	0,6	0,252	Baja
10	Yaguarón	1	0,7	1	0,7	Alta
11	Yaguarón	1	0,7	1	0,7	Alta
12	Yaguarón	1	0,7	1	0,7	Alta
13	Yaguarón	1	0,7	1	0,7	Alta
14	Centro de Salud	0,6	0,7	0,7	0,294	Moderada
15	Arruaí	0,6	0,7	0,7	0,294	Moderada
16	Cerro León	0,6	0,7	0,8	0,336	Moderada
17	1ro de Mayo P1	0,6	0,7	0,6	0,252	Baja
18	1ro de Mayo P2	0,6	0,7	0,6	0,252	Baja
19	Cerro León	0,6	0,7	0,7	0,294	Moderada
20	Mbaritú	0,4	0,7	1	0,196	Baja

Ocurrencia del agua subterránea (Factor G)

Los pozos en donde la zona no saturada es de poco espesor, con nivel estático de 0 a 7 metros de profundidad en este trabajo se consideró como acuífero no confinado (valor 1 para el parámetro G) y cuando la zona no saturada es de mayor espesor que el anterior y está cubierto por arcillas o areniscas arcillosas se consideró como acuífero no confinado cubierto (valor $G=0,6$) así como se puede observar en la Figura 4 G.

Evaluación del sustrato litológico (Factor O)

El área de investigación forma parte del Acuífero Patiño y está conformado por areniscas de la Formación Yaguarón así como se puede apreciar

las Figuras 4 O y 5.

Evaluación de la profundidad de las aguas subterráneas (factor D)

En la Tabla 2 se detallan los niveles estáticos en metros y el Factor D obtenido para cada pozo. En el área se presentan 4 rangos de profundidad de los siete establecidos en el método GOD-S. El primero corresponde a las profundidades menores a 2 metros y se tienen en la Compañía de Curupayty y en el área urbana del Distrito de Yaguarón, el siguiente rango de profundidad que va de los 5 a 10 metros y se ubica en las compañías de Tacuarindy-Guarapí del distrito de Yaguarón y en la compañía Cerro León del Distrito de Pirayú mientras que en la zona

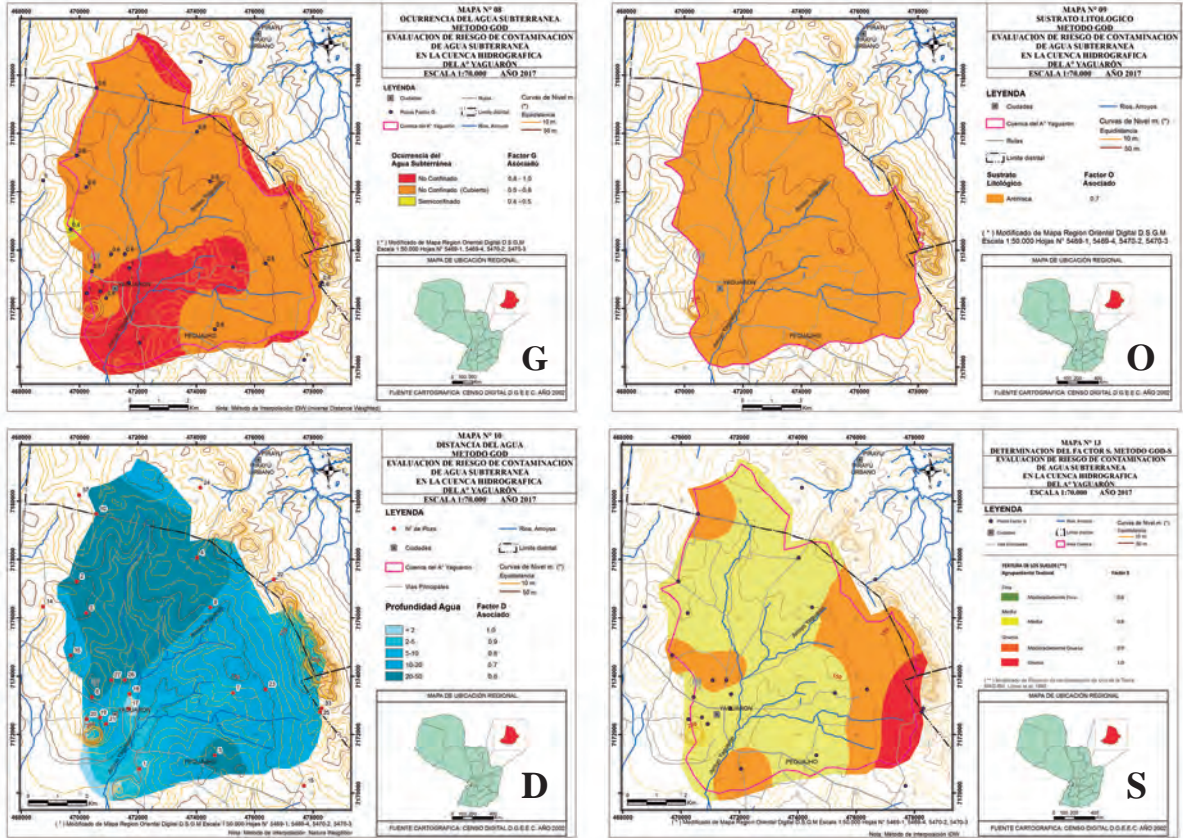


Figura 4. Mapas de Parámetros o Factores para la Determinación de la Vulnerabilidad por GOD-S. G) Factor G. O) Factor O. D) Factor D. S) Factor S.

Noroeste del área de investigación se encuentran las compañías con mayores profundidades del agua subterránea, como se puede observar en la Figura 4 D.

En la Tabla 2 se muestra el producto de los valores G, O y D, con el valor de vulnerabilidad

correspondiente para cada pozo. Durante el proceso de la evaluación, el factor más importante en la diferenciación de los niveles cualitativos de la vulnerabilidad, fue la profundidad de las aguas subterráneas.

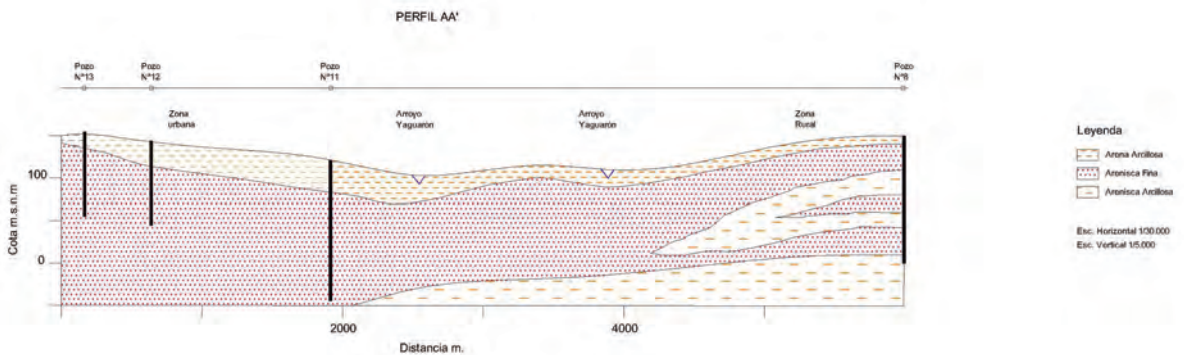


Figura 5. Perfil estratigráfico A.A'.

Tabla 3. Valores de Factor S en el área de la Cuenca Hidrográfica del Arroyo Yaguarón.

Localidad	Distrito	Valor Factor S	Agrupación textural
Cocuerepoty	Pirayú	0,9	Moderadamente Grueso
Zaguazú	Yaguarón	0,7	Medio
Mbaritú	Yaguarón	0,9	Moderadamente Grueso
Yaguarón Urb.	Yaguarón	0,7	Medio
Sambonini	Yaguarón	0,6	Moderadamente Fino
Guayaibity	Yaguarón	0,8	Medio
Tacuarindy	Yaguarón	0,7	Medio
Guarapí	Yaguarón	1	Grueso
Pororo	Yaguarón	0,8	Medio
Pirayú Calle	Yaguarón	0,8	Medio
Cerro Guy	Yaguarón	0,9	Moderadamente Grueso
Tacumbú	Yaguarón	0,9	Moderadamente Grueso
Zayas	Yaguarón	0,6	Moderadamente Fino
Kaaguy Poti	Pirayú	0,9	Moderadamente Grueso
Tuyucúa Cocué	Pirayú	0,8	Medio
Ykuá Kaú	Pirayú	0,8	Medio
Calle Poí	Yaguarón	0,9	Modernamente Grueso
Curupayty	Yaguarón	0,9	Moderadamente Grueso
Peguajho	Yaguarón	1	Grueso
Itapotrero	Yaguarón	0,6	Moderadamente Fino

Evaluación del Factor S.

Este Factor se ha determinado en base a las texturas de suelo presentes en el área de investigación y fueron analizadas en el laboratorio, a las cuales se le ha

asignado el puntaje correspondiente y agrupados a fin de obtener el puntaje final del Factor S de cada muestra (Tabla 3).

En la Figura 4 S se puede observar la distribución espacial de las distintas granulometrías encontradas en el área de estudio. Las compañías de Guarapí, Peguajho, Curupayty, Mbaritú, Kaaguy Poti, Cerro Guy, Tacumbú, Cocué Poti y Calle Poí obtuvieron el valor más alto de los asignados como Factor S, debido a la textura más gruesa en el área de estudio y representarían una menor protección para el acuífero.

Determinación de la vulnerabilidad de acuerdo al índice GOD-S

Para determinar la vulnerabilidad por el método GOD-S se realizó una multiplicación directa del Factor S con los valores resultantes de la vulnerabilidad GOD, de esta manera al incorporar el Factor S en la evaluación los resultados obtenidos difieren en gran medida. Esto lo demuestran los puntajes obtenidos por cada pozo como se puede apreciar en la Tabla 4.

Así prácticamente toda el área que de acuerdo al índice GOD fue de vulnerabilidad moderada a través del índice GOD-S pasa a ser de vulnerabilidad baja, esto se nota en el área noroeste de la Cuenca; por otro lado, se redujo el área de vulnerabilidad alta a moderada en la zona urbana del Distrito de Yaguarón como se puede observar en las Figuras 6A y 6B

Las zonas con vulnerabilidad alta a la contaminación corresponden a parte del área urbana del Distrito de Yaguarón y la compañía Curupayty, las demás compañías son de vulnerabilidad moderada a baja.

Las actividades desarrolladas en el área de investigación se clasifican en las siguientes: Desarrollo Urbano, Actividad Industrial y Actividad Agropecuaria que según su ocurrencia espacial y temporal se vuelven a clasificar en puntuales y difusas según el método POSH.

Fuentes potenciales de contaminación puntual

Las fuentes potenciales de contaminación puntuales

Tabla 4. Vulnerabilidad GOD-S.

N°	Localidad	G*O*D	Valor Factor S	G*O*D*S	Vulnerabilidad GOD-S
1	Curupayty	0,7	0,9	0,63	Alta
2	Itá Potrero	0,252	0,6	0,1512	Baja
3	Guarapí	0,252	0,7	0,1764	Baja
4	Guayaibity	0,252	0,8	0,2016	Baja
5	Zaguazú	0,252	0,7	0,1764	Baja
6	Tacuarindy - Guarapí	0,56	0,7	0,392	Moderada
7	Caraunguá	0,252	0,7	0,1764	Baja
8	Pororo - Pirayú Calle	0,294	0,8	0,2352	Baja
9	Caaguy Potí	0,252	0,9	0,2268	Baja
10	Yaguarón	0,7	0,7	0,49	Moderada
11	Yaguarón	0,7	0,7	0,49	Moderada
12	Yaguarón	0,7	0,7	0,49	Moderada
13	Yaguarón	0,7	0,7	0,49	Moderada
14	Centro de Salud	0,294	0,7	0,2058	Baja
15	Arrua'í	0,294	0,9	0,2646	Baja
16	Cerro León	0,336	1	0,336	Moderada
17	1ro de Mayo P1	0,252	0,9	0,2268	Baja
18	1ro de Mayo P2	0,252	0,9	0,2268	Baja
19	Cerro León	0,294	1	0,294	Moderada
20	Mbaritú	0,196	0,9	0,1764	Baja

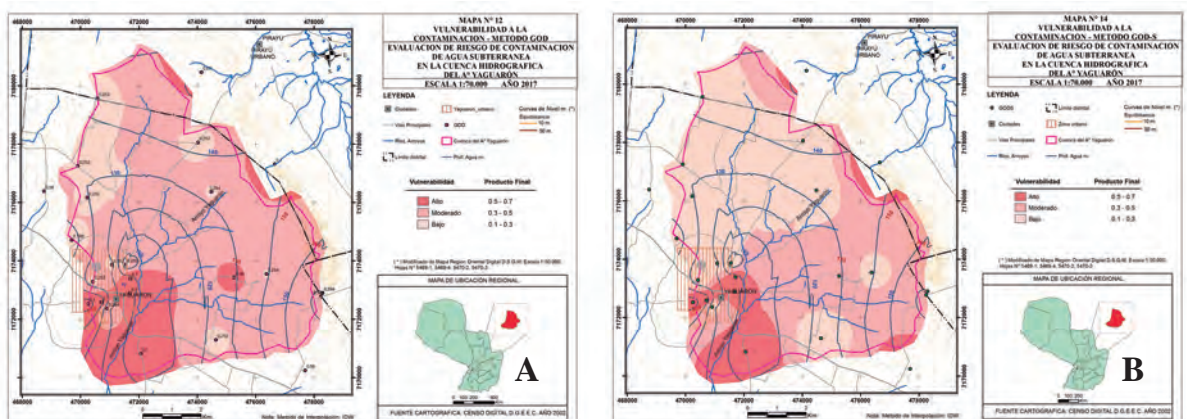


Figura 6. Mapas de Vulnerabilidades. A) Vulnerabilidad por GOD. B) Vulnerabilidad por GOD-S.

se clasificaron como se puede ver en la Tabla 5. El inventario arrojó un total de 213 fuentes potenciales puntuales de contaminación, distribuidas en toda el área de estudio según se detalla a continuación:

Fuente Tipo 3: fueron ubicadas y georreferenciadas 44 actividades de este tipo, manipulan grandes volúmenes de hidrocarburos potencialmente contaminantes almacenados en tanques enterrados que no permiten una inspección visual de fugas. Este tipo de Fuente puede contaminar al acuífero con tricloroelileno, tetracloroetileno, otros hidrocarburos halogenados, metales pesados, fenoles y cianuro, benceno, hidrocarburos aromáticos y grasas que

podrían contaminar el suelo y subsuelo hasta llegar al acuífero.

Las curtidurías están ubicadas muy cerca del cauce del Arroyo Yaguarón y en una de ellas se pudo constatar que implementa las lagunas de efluentes como tratamiento primario de los residuos líquidos. Cabe mencionar que estas lagunas no reciben un mantenimiento sistemático, y se encuentran sin impermeabilizar, situación que contribuye a la infiltración de los efluentes hacia el subsuelo y con ello la posibilidad de contaminación de los cuerpos de agua subterráneos. En el vertedero municipal la disposición de residuos se realiza principalmente

Tabla 5. Clasificación de Fuentes Puntuales de contaminación.

Nivel de Carga Contaminante	Fuente Potencial de Contaminación
Elevado	TIPO 3 3.A. Estación de Servicio 3. B. Talleres Mecánicos 3.C. Curtiembres, fábrica de cuero 3.Ca Matadería 3. D. Procesamiento de Metal (Metalúrgica, Herrería, Tornería, fábrica de portones y sillones) 3. E. Vertedero 3.F Aceitera
Moderado	TIPO 2 2. A. Lavaderos de autos 2. B. Peluquerías
Reducido	TIPO 1 1.A. Carpinterías 1.B. Balnearios 1. C. Supermercados 1. D. Construcción 1. E. Olerías 1. F. Fábricas (arroz, calzados, ropas) 1. G. Cementerios 1.H. Centros Médicos 1.I. Hotel/Motel

sobre suelos de textura Gruesa a Modernamente Gruesa, los cuales se caracterizan por buen drenaje interno y externo, que pueden favorecer la infiltración de los lixiviados derivados de su descomposición, tanto más si se tiene en cuenta que en el año 2012 la precipitación real acumulada fue de más de 1000 mm/a. Toda esta situación contribuye a la contaminación del agua subterránea.

Fuente Tipo 2 o moderado: fueron identificadas y ubicadas en el área de investigación 15 actividades con nivel de generación potencial de contaminación moderado debido a que vierten directamente sus desechos líquidos al suelo y contienen sustancias nitrogenadas, fenoles, hidrocarburos halogenados y aromáticos, sales, asimismo utilizan sustancias, tóxicas, corrosivas e inflamables, con compuestos como los cloruros, compuestos orgánicos volátiles, metales pesados, fenoles y otros. Otra razón importante por la que se le consideró como fuente tipo 2 es porque los residuos líquidos son depositados en pozos ciegos o directamente al suelo.

Fuente Tipo 1 o reducido: se han encontrado 144 fuentes potenciales de contaminación con nivel de carga contaminante reducido, de los cuales el más abundante con el 61% es la actividad dedicada a la olería o fábrica de ladrillo. En este apartado se le incluye a las olerías como una actividad que facilita a la contaminación del acuífero debido a la extracción de la capa protectora o suelo arcilloso. Las fábricas de ropas, calzados, se les consideraron como carga contaminante reducida por ser industrias que no generan cargas contaminantes capaces de afectar al suelo o al subsuelo.

Las Fuentes tipo 3, 2 y 1 fueron ubicados en el mapa de Vulnerabilidad a la contaminación por el método GOD-S a fin de obtener los riesgos potenciales de contaminación para cada tipo de fuente. así como se observan en las Figuras 7 A, B y C respectivamente.

Fuente de Contaminación Difusa

Corresponden a Áreas residenciales urbanas y rurales sin servicio de alcantarillado y la actividad

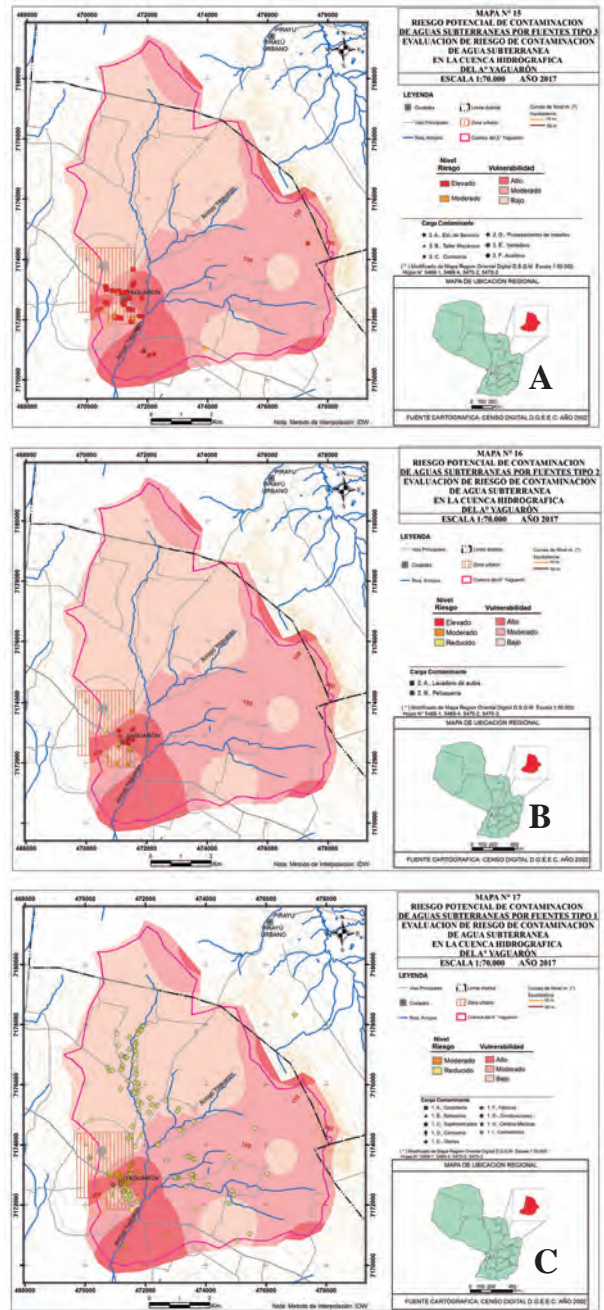


Figura 7. Mapas con Riesgo Potencial de Contaminación según Tipos de Fuente. A) Fuente tipo 3. B) Fuente tipo 2. C) Fuente tipo 1.

agropecuaria. En el área de investigación no se cuenta con alcantarillado sanitario y la forma más común de eliminar sus desechos líquidos es a través de pozo ciego. Tales sistemas funcionan por la

Tabla 6. Generación potencial de carga contaminante debido al saneamiento in situ en el área de investigación.

Área	Población del área de investigación	Superficie total (ha)	Densidad (hab/ha)	Cobertura de alcantarillado %	Carga Contaminante
Urbana	498.13		13	0	Moderado
Rural	5692		4	0	Bajo
Total:	10154	6192	1,64	0	Moderado

percolación del efluente líquido hacia el subsuelo, así como se puede observar en la Tabla 6.

Los tipos de contaminantes comúnmente asociados con el saneamiento in situ son los componentes del nitrógeno (inicialmente en la forma amonio, pero normalmente oxidado a nitrato), contaminantes microbiológicos (bacterias patógenas, virus y protozoarios) y en algunos casos

comunidades de sustancias químicas orgánicas sintéticas. Los niveles de riesgo del saneamiento in situ en el área de investigación van del moderado y bajo, el índice moderado se concentra en el área urbana del Distrito de Yaguarón, así como se muestra en la Figura 8A.

Actividad agropecuaria

Para esta investigación el nivel de carga potencial de contaminación se realizó de acuerdo al método POSH, este tipo de actividad puede generar carga contaminante como nitratos, amonio, pesticidas, organismos fecales. Se tuvo en cuenta que el área se realiza la rotación de cultivos tradicionales, pastoreo extensivo en cuanto a la ganadería, sistema de granjas ecológicas en suelos que corresponden a la clasificación de tierras agrícolas y pecuarias como se observa en la Tabla 7. Los resultados de nivel de riesgo potencial a la contaminación fueron representados en la Figura 8B.

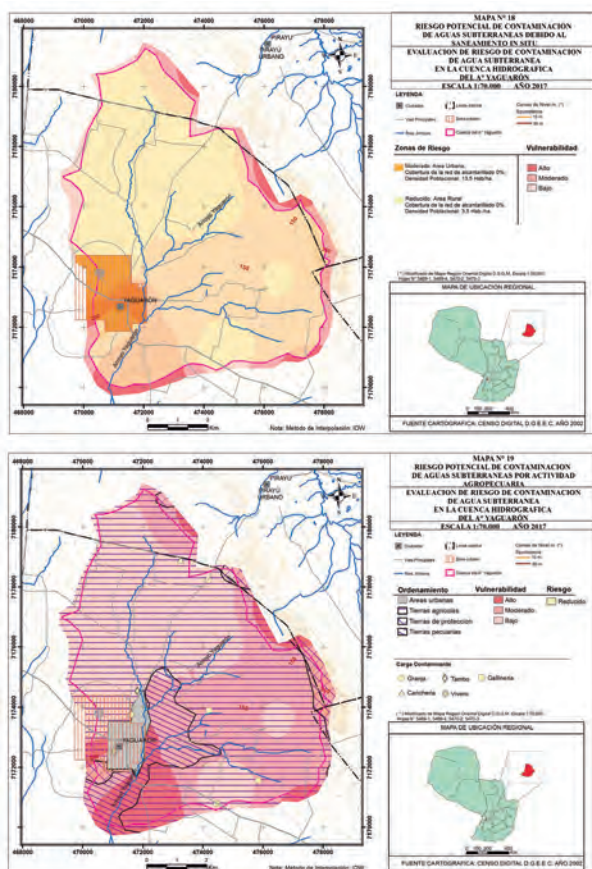


Figura 8. Nivel de riesgo debido al saneamiento in situ y la actividad Agropecuaria. (A: Saneamiento in Situ; B: Actividad agropecuaria).

Tabla 7. Actividades Georreferenciadas en el área de investigación.

N°	Nombre	Ubicación		Carga Contaminante
		X	Y	
1	Granja	475854	7171560	reducido
2	Granja	474471	7170789	reducido
3	Chanchería	473264	7178896	moderado
4	Gallinería	474217	7173882	moderado
5	Tambo	471824	7174547	reducido
6	Granja	474195	7178228	reducido
7	Vivero	471041	7172532	reducido
8	Granja	471615	7173758	reducido

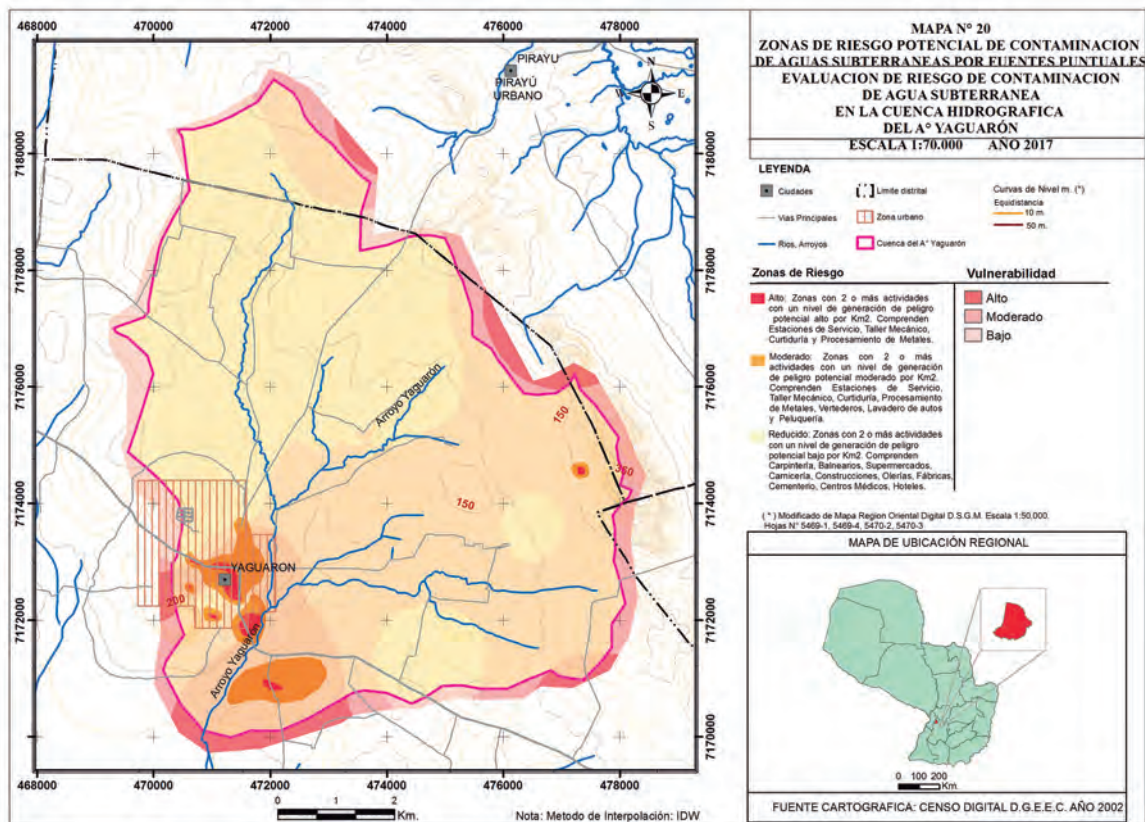


Figura 9. Zonas de Riesgos potenciales a la contaminación por Fuentes Puntuales.

Zonas de Riesgo Potencial de Fuentes puntuales en el área de investigación

En el área de investigación se identificaron y ubicaron un total de 49 Fuentes potenciales de contaminación con nivel de riesgo alto. Para zonificar las áreas de riesgo potencial de contaminación fueron superpuestos los mapas de riesgo Potencial de contaminación por fuentes Tipo 1, 2 y 3 y cuyo resultado fue representado en la Figura 9.

Las zonas de riesgo potencial de contaminación de agua subterránea por Fuentes Puntuales se representan con color rojo, naranja y amarillo y van de altas, moderadas y bajas respectivamente. Las zonas con riesgo potencial de contaminación alto se encuentran en áreas de vulnerabilidad alta con dos o más actividades con un nivel de riesgo de contaminación alto por km², corresponden a las estaciones de servicio, curtidurías, talleres mecánicos y vertedero. Las aguas subterráneas pueden ser afectadas

por hidrocarburos aromáticos, fenoles, cianuros, benceno, metales, cargas orgánicas y salinas.

Zonas de riesgo potencial de contaminación de aguas subterráneas por fuentes potenciales difusas

Se obtuvo el mapa de zonas de riesgo potencial de contaminación por fuentes difusas superponiendo los dos mapas de riesgo potencial de contaminación por saneamiento in situ y actividad agropecuaria, así como se puede ver en la Figura 10.

Las zonas de riesgo resultantes son altas, moderadas y bajas de color rojo, naranja y amarillo respectivamente. Las zonas de riesgo altas es consecuencia del nivel de la carga contaminante moderado del saneamiento in situ y la vulnerabilidad alta, en cambio las zonas de riesgo bajo es a consecuencia del saneamiento in situ y el nivel de carga contaminante bajo de las actividades agrope-

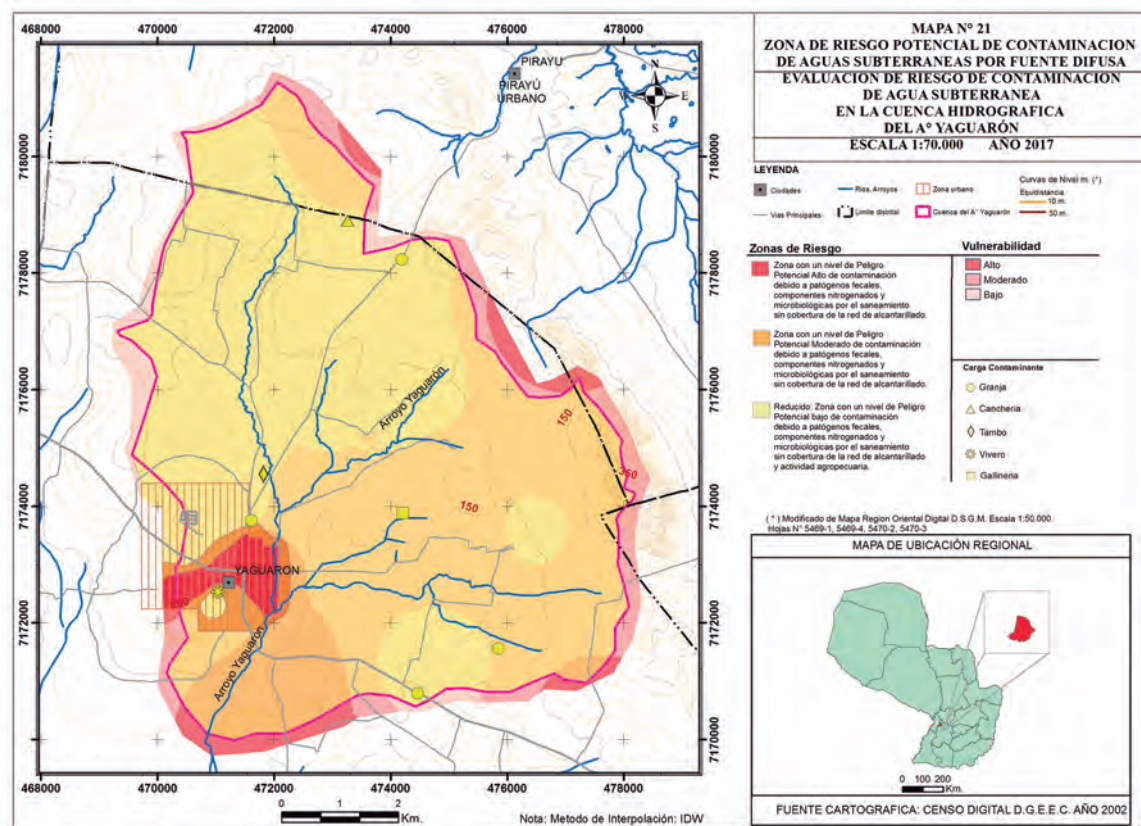


Figura 10. Zonas de Riesgos potenciales de contaminación por fuentes difusas.

cuarias con vulnerabilidades del área baja.

De esta manera se obtuvieron zonas de riesgo potencial de contaminación alto en el área urbana del distrito de Yaguarón y en el área rural zonas de riesgo bajo. En estas zonas el agua subterránea podría estar contaminadas con carga orgánica nutriente, patógenos fecales, componentes nitrogenados, cloruros.

Zonas de con riesgo potencial de contaminación para las aguas subterráneas en el área de la Cuenca Hidrográfica del arroyo Yaguarón.

Las zonas de riesgo potencial a la contaminación final se obtuvieron superponiendo los mapas de zonas de riesgo potencial de contaminación por fuentes puntuales y difusas, así como se observa en la Figura 11.

En el área urbana del distrito de Yaguarón, se encuentran las zonas con riesgo potencial de conta-

minación alto y moderado debido a la concentración de actividades con un nivel de riesgo potencial de contaminación alto hacia las aguas subterráneas, en áreas con una superficie inferior al km^2 y la cobertura de la red de alcantarillado nulo, razón por la que las aguas subterráneas pueden ser afectadas por hidrocarburos aromáticos, fenoles, cianuro, benceno, metales y patógenos fecales.

En el área rural del área de investigación las zonas de riesgo son en su mayoría baja, exceptuando el área en donde se encuentra el vertedero municipal con un nivel de riesgo potencial de contaminación alto a moderado, esto se debe a la textura de suelo gruesa a moderadamente gruesa, la manera de deposición de los residuos ya que no se realiza la clasificación, lo que aumenta la probabilidad de infiltración de contaminantes al agua subterránea.

En la compañía Curupayty también se encuentran zonas de riesgo alto a moderado por la ubica-

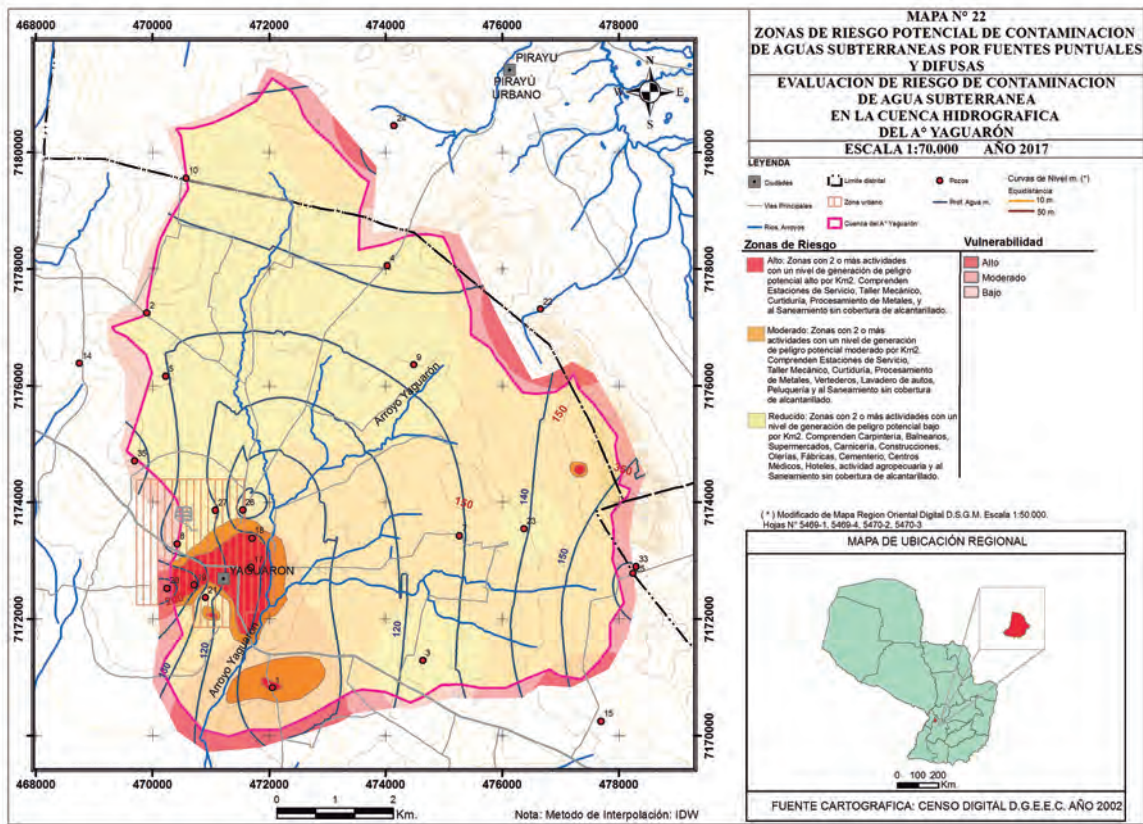


Figura 11. Zonas de Riesgos potenciales por fuentes puntuales y Difusas.

ción de zonas de riesgo potencial de contaminación por fuentes Tipo 2 y 3 como las curtidurías y la fábrica de aceite, las aguas subterráneas pueden ser afectadas por cargas orgánicas nitrogenados, cianuro, benceno, metales y patógenos fecales. Cabe destacar que existen fuentes potenciales de contaminación que están muy próximos a la red hídrica y a los pozos de abastecimiento de agua potable.

Esto puede contribuir al deterioro de la calidad de las aguas subterráneas en este sector hidrogeológico que se explotan con varios fines, destacándose el más importante, el suministro de agua para consumo humano.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos con la aplicación del método GOD y luego con la indexación del Factor S, para aplicar el método GOD-S, indican que el Acuífero Patiño presenta un nivel alto de vulnera-

bilidad a la contaminación en el área urbana del distrito de Yaguarón y en la compañía Curupaty, disminuyendo a un nivel moderado a bajo, hacia las demás compañías del área de investigación. Los factores que influyeron en el nivel de vulnerabilidad son la profundidad del agua subterránea y la textura de suelo.

En el área de la Cuenca Hidrográfica del arroyo Yaguarón se ubican y funcionan diversas actividades que generan distintos niveles de riesgos potenciales a la contaminación hacia las aguas subterráneas producto de la localización de ellas en áreas vulnerables de la Cuenca, y a sus niveles de generación de carga contaminante. De estas actividades, las de alto riesgo corresponden a las estaciones de servicio, curtidurías, talleres mecánicos, vertedero y al saneamiento sin cobertura de alcantarillado.

Las zonas de riesgo potencial de contaminación

alto se encuentran en el área urbana del Distrito de Yaguarón., compañía Curupayty, y Pirayú Calle coincidiendo en áreas con niveles de vulnerabilidad alta de contaminación. Ante lo expuesto se comprueba que en el área de investigación existen zonas de riesgos altos a la contaminación del acuífero debido a la localización de actividades generadoras de cargas contaminantes elevadas en zonas de alta vulnerabilidad

AGRADECIMIENTOS

A Dios todo poderoso, por guiarme por el camino del éxito. A toda mi familia; mis padres, esposo, hija, hermanos Lilian y Ever y sobrinas por ser mi soporte en los momentos de dificultades y alegrías. A los profesores Dra. Ana María Castillo, MSc. Viviana Díaz Escobar, MSc. Narciso Cubas, y MSc. Higinio Moreno por sus valiosos aportes y críticas. Al Lic. Joel Cabrera por la ayuda valiosa para la realización de los mapas.

LITERATURA CITADA

- Aller, L., Lehr, J. H., Petty, R. & Bennett, T. (1987). *DRASTIC: a standardized system to evaluate groundwater pollution potential using hydrogeologic settings*. National Water Well Association, Worthington, Ohio, United States of America.
- Báez, L., Villalba, C. & Nogues J.P. (2014). *Mapeo de la Vulnerabilidad y Riesgo de Contaminación del Agua Subterránea del Gran Asunción*. Disponible en: [http://www.estudiopatino.pol.una.py/descargas/Informe%20Fin al%20Politecnica%20I NV20.pdf](http://www.estudiopatino.pol.una.py/descargas/Informe%20Fin%20Politecnica%20I%20NV20.pdf).
- Cardoso, L. V. R. Q. (2010). *Estudo Comparativo dos Métodos Drastic e God na Avaliação da Vulnerabilidade das Águas Subterrâneas à Poluição da Bacia Hidrográfica do Rio Cabril-Vila Real*. Tesis de Maestría.
- DGEEC (2002). *Censo 2002*. Asunción, Paraguay: Dirección General de Estadística, Encuesta y Censo. Disponible en: <https://www.dgeec.gov.py>
- DGEEC (2012). *Anuario Estadístico del Paraguay*. Asunción, Paraguay: Dirección General de Estadística, Encuesta y Censo. Disponible en: <https://www.dgeec.gov.py>
- Dirección del Servicio Geográfico Militar (2007). *Mapa de la Región Oriental Digital*. 1:50.000. Hojas 5469-1, 5470-2 y 5470-3.
- Foster, S; Ventura, M. & Hirata, R. (1987). *Contaminación de las aguas subterráneas, un enfoque ejecutivo en relación con el suministro de agua potable*. Perú: Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS), Organización Mundial de la Salud (OMS), Organización Panamericana de la Salud (OPS). 42 p.
- Foster, S. & Hirata, R. (1991). *Determinación del riesgo de contaminación de aguas subterráneas, una metodología basada en datos existentes*. Centro Panamericano de Ingeniería.
- Foster S, Garduño H. & Bengoechea V. (2002). *El uso de agua subterránea en Gran Asunción: problemas actuales y regulación propuesta*. Disponible en: <http://www.geologiadelparaguay.com/Uso-del-Agua-Gran-Asuncion.pdf>.
- Hernandez Sampieri, R., Fernandez Collado, C. & Bartista Lucio, P. (1998). *Metodología de la investigación*. México: Editorial Mc Graw Hill, 15-40
- Hirata, R. (1994). *Fundamentos e estrategias de protección y control de la calidad de las aguas subterráneas: estudio de casos en el Estado de San Pablo*. Tesis Doctoral
- Hirata, R. (2002). Carga Contaminante y Peligros a las Aguas Subterráneas. *Revista Latino-Americana de Hidrogeología*.
- Kalaoum, J. (2016). *Avaliação da vulnerabilidade de contaminação do sistema de Aquíferos do Município de Queimados-RJ*. Tesis de Maestría.