

Estudio de recursos hídricos  
y vulnerabilidad climática del

# ACUÍFERO PATIÑO

---

## AUTORES

*Miguel Ángel Arrabal*

*Mónica Álvarez*

## EDITORES

*José Francisco Manjarrés*

*Eduardo Bogado*

---



Este material de aprendizaje fue elaborado por el Grupo INCLAM S.A. Los recursos para elaborar estos estudios proceden de la Facilidad de Inversiones para América Latina (LAIF) de la Unión Europea. En el marco de este instrumento de financiamiento, la Unión Europea firmó un acuerdo con la Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AECID) para la gestión del proyecto regional “Promover la adaptación al cambio climático y la gestión integral de los recursos hídricos en el sector de agua y saneamiento en América Latina en el marco del Fondo de Cooperación para Agua y Saneamiento (FCAS)”, el cual establece que las actividades relacionadas con asistencias técnicas serán ejecutadas a través del BID. El presente documento hace parte de la Cooperación Técnica “Estudio de los recursos hídricos y vulnerabilidad climática del acuífero Patiño” (PR-T1207). Las opiniones expresadas en el mismo no reflejan necesariamente la opinión oficial de la Unión Europea ni de la AECID.

**Palabras claves:** Aguas subterráneas, acuíferos, gestión integrada de los recursos hídricos, agua, saneamiento, cambio climático, evaluación de riesgos y vulnerabilidades.

---

Copyright © 2019 Banco Interamericano de Desarrollo. Esta obra se encuentra sujeta a una licencia Creative Commons IGO 3.0 Reconocimiento-NoComercial-SinObrasDerivadas (CC-IGO 3.0 BY-NC-ND) (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/igo/legalcode>) y puede ser reproducida para cualquier uso no comercial otorgando el reconocimiento respectivo al BID. No se permiten obras derivadas.

Cualquier disputa relacionada con el uso de las obras del BID que no pueda resolverse amistosamente se someterá a arbitraje de conformidad con las reglas de la CNUDMI (UNCITRAL). El uso del nombre del BID para cualquier fin distinto al reconocimiento respectivo y el uso del logotipo del BID no están autorizados por esta licencia CC-IGO y requieren de un acuerdo de licencia adicional.

Note que el enlace URL incluye términos y condiciones adicionales de esta licencia.

Las opiniones expresadas en esta publicación son de los autores y no necesariamente reflejan el punto de vista del Banco Interamericano de Desarrollo, de su Directorio Ejecutivo ni de los países que representa.



# 01

---

4.  
**Hidrología subterránea.**  
*Gestión conjunta hidrología subterránea y superficial.*

# 02

---

8.  
**Acuífero Patiño.**  
*Bajo el foco de la preservación.*

# 03

---

12.  
**Situación actual del acuífero Patiño.**  
*Balance hídrico.*

# 04

---

18.  
**Situación futura.**  
*Escenarios de futuro.*

# 05

---

22.  
**Vulnerabilidad y riesgo.**  
*Planificación para la protección de las aguas subterráneas.*

# 06

---

26.  
**Zonas de protección.**  
*Controlar y reducir riesgos.*

# 07

---

29.  
**Diagnóstico estratégico.**  
*Problemática detectada.*

# 08

---

34.  
**Líneas de acción.**  
*Construyendo el Plan Estratégico de acción.*

# 09

---

38.  
**Transferencia del conocimiento.**  
*Herramienta de continuidad del Plan.*

# 10

---

40.  
**Conclusiones.**



01

# HIDROLOGÍA SUBTERRÁNEA

---

Gestión conjunta hidrología  
subterránea y superficial.

## GESTIÓN INTEGRADA DE LOS RECURSOS HÍDRICOS

Los diversos intereses relacionados con el uso del agua plantean retos importantes y muy variados que inciden en la toma de decisiones relativas al manejo de los recursos hídricos, particularmente cuando se pretende satisfacer aplicando principios de equidad y de conservación del recurso, las necesidades y deseos de los diferentes usuarios y de las partes interesadas.

Esa visión de conjunto se denomina gestión integrada de los recursos hídricos (GIRH), que integra los intereses vinculados con el uso, control, aprovechamiento, preservación y sostenibilidad de los sistemas hídricos (GWP 2000).

Con la definición de nuevos principios sobre la gestión del agua ha comenzado un cambio de paradigma desde un sistema de manejo centrado en lo sectorial, en la infraestructura y en las inversiones hacia una aproximación multidisciplinaria, multisectorial e integrada.

El objetivo es armonizar los diversos usos presentes y futuros, sin que la visión exclusiva sobre el agua sea meramente la económica, pues a ésta deben incorporarse la variable ambiental y los intereses sociales.

La GIRH está llamada a constituirse en el referente para el diseño de modelos de gestión pública del agua y de sus instituciones a nivel internacional. Para el diseño de la política, este concepto se materializó a través de la definición del ciclo para la gestión integral del recurso hídrico, que implica un proceso de mejoramiento continuo

La experiencia en la gestión de los recursos hídricos ofrece oportunidades significativas en la mejora del uso del agua y permite alcanzar objetivos relacionados con la política del agua mucho más ambiciosos (Ross, 2012).

Uno de los aspectos a tener en consideración para la GIRH es el uso conjunto de las aguas subterráneas y superficiales, considerando además como necesaria la Gestión Integrada de las Aguas Subterráneas (GIAS).

En relación al primer aspecto existen elevados costos relacionados con la no integración o uso conjunto de las aguas subterráneas y superficiales, tales como la reducción de entradas de agua en el acuífero, afectación sobre la calidad del agua debido a interacción del flujo entre diversas fuentes que lleva a producir daños a los ecosistemas ribereños relacionados con las masas de agua y zonas húmedas (Ross, 2012) y (European Commission, 2007).

Por su lado la gestión o uso conjunto de las aguas superficiales y subterráneas presenta unos beneficios indudables. Considerar el recurso conjuntamente permite optimizar la oferta de agua y de esta forma poder discriminarla en función de la disponibilidad y coste del recurso, permite utilizar los acuíferos como reservorios estratégicos para cubrir demandas en momentos de sequía o escasez, de la misma forma que pueden ser utilizados para poder almacenar e incluso transportar agua, permitiendo a su vez una depuración natural del agua.

**Todos estos beneficios no son posibles** si antes no se conocen y protegen los acuíferos impidiendo su contaminación y degradación.

## GESTIÓN INTEGRADA DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

La gestión integral del recurso hídrico busca orientar el desarrollo de políticas públicas, a través de una conciliación entre el desarrollo económico y social y la protección de los ecosistemas (Jakeman, Barreteau, & Rinaudo, 2016).

Una gestión adecuada de los recursos hídricos debe incluir a todos los actores implicados en sus respectivos ámbitos en donde se recogen sus necesidades, estableciendo mecanismos adecuados de gobernanza entre ellos que permitan definir las acciones a tomar para salvaguardar los recursos de forma integrados.

La gestión integral de los recursos hídricos necesita una administración lo suficientemente preparada para poder ejercer el control técnico y administrativo de este recurso, que a su vez ejerza el liderazgo sobre el resto de actores en el proceso de gestión y gobernanza.

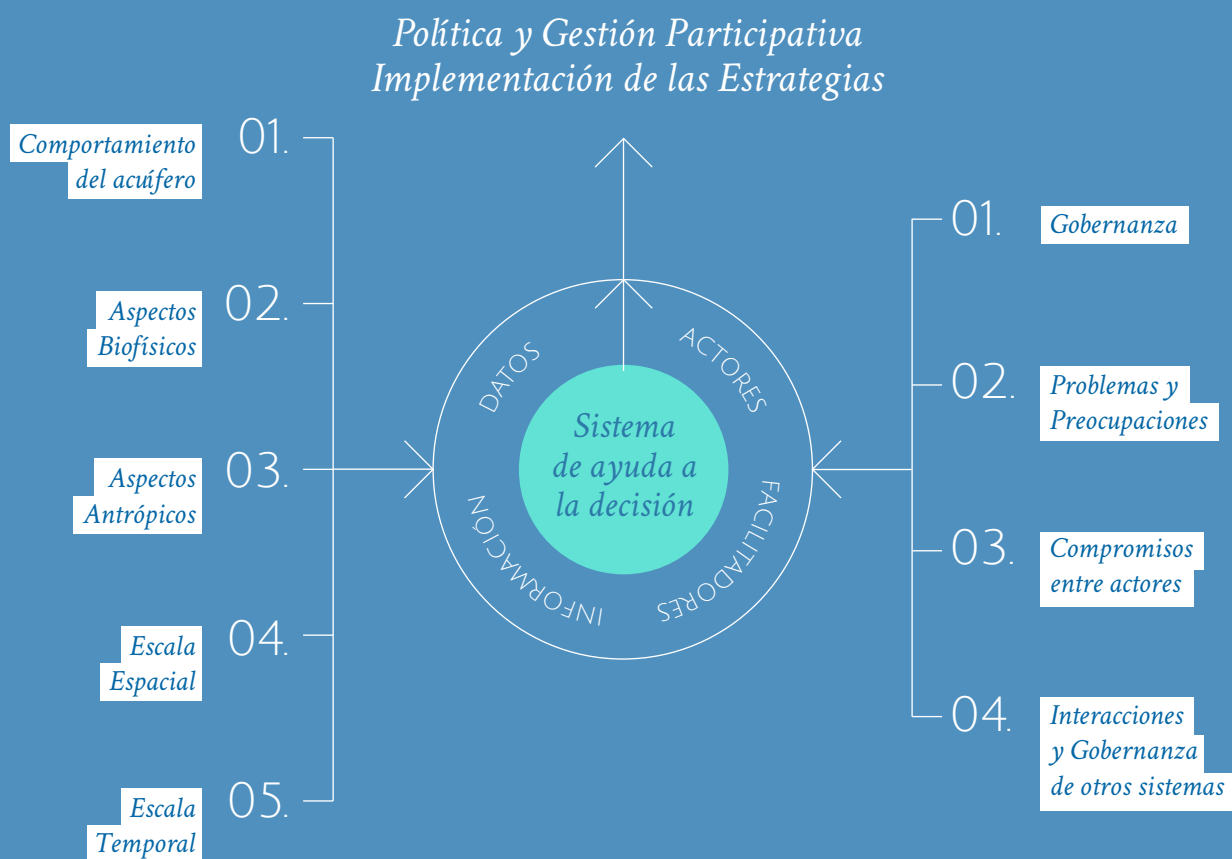
Esta administración debe considerar de forma integrada, la gestión técnica a través del análisis de datos que contemple su adecuada recopilación, tratamiento y almacenamiento, así como la adecuada interacción con los actores que intervienen en la gestión del agua.

*GIRH: usos, control, aprovechamiento, preservación y sostenibilidad.*



*El volumen de agua subterránea con que cuenta el Paraguay no ha sido cuantificado en su verdadera magnitud, configurándose como un capital complementario a las aguas superficiales.*

## GESTIÓN INTEGRAL DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS



Los análisis deben poder apreciar la situación actual del acuífero y a su vez percibir tendencias futuras que pongan en riesgo la cantidad o calidad del agua en el acuífero. Para ello debe dotarse de personas con el conocimiento adecuado en gestión del agua y de las herramientas de gestión necesarias para llevar esta labor a buen término, tales como equipos de medición, equipos informáticos o software de análisis.

Respecto de la interacción con los actores relacionados con la gestión del agua se deben contemplar los aspectos socioeconómicos y ecológicos que interaccionan en los recursos. Por tanto, la gestión integral del agua debe considerar los medios y los espacios necesarios para poder realizar la interacción y actuación de los diferentes actores que intervienen en la gestión.



# 02

## ACUÍFERO PATIÑO

---

Bajo el foco de la preservación.





## LOCALIZACIÓN

El acuífero Patiño es un acuífero libre localizado en el flanco oriental del Alto de Asunción que aflora en forma triangular, formando vértices en la ciudad de Asunción, el río Paraguay y la ciudad de Paraguari, así como una pequeña región en el Chaco, en el municipio de Benjamín Aceval.

Abarca aproximadamente 1.176 km<sup>2</sup> de extensión e incluye en su territorio la ciudad de Asunción y la zona conurbana, así como los distritos de Limpio, Mariano Roque Alonso, Asunción, Lambaré, Fernando de la Mora, San Lorenzo, Luque, Areguá, Capiatá, J. Augusto Saldívar, Itauguá, Itá, Ypané, Guarambaré, Villa Elisa, Ñemby, San Antonio, Yaguarón y parte de Paraguari e Ypacaraí.



## FUENTE DE AGUA ESTRATÉGICA

Es una de las principales fuentes de abastecimiento de agua para consumo doméstico, agrícola e industrial de Asunción y su área metropolitana, así como todo el Departamento Central y parte del Departamento de Paraguari. El agua que se extrae del acuífero da servicio a más de 1 millón de personas.

El área del acuífero Patiño abarca en gran parte zonas urbanas del país, lo cual condiciona la situación del mismo debido a las elevadas presiones antrópicas que sufre. Los bombeos continuados a lo largo del tiempo han afectado los niveles y los flujos existentes y la relación con las masas de agua adyacentes en los límites del acuífero, pudiendo agravar el problema de la calidad del agua del acuífero.



## CARACTERÍSTICAS CLIMÁTICAS

En el área del acuífero Patiño el clima es subtropical húmedo, con una precipitación promedio anual de 1408 mm y temperatura promedio máxima anual de 28,6°C y promedio mínima anual de 18,3°C (datos estación Aeropuerto, periodo entre 1970 y 2017).

La precipitación presenta un comportamiento estacional donde el periodo de mayor precipitación y temperatura se concentra entre noviembre y febrero.



“

*El acuífero Patiño es una  
fuente de agua estratégica.*

”

## 4

CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS 

La litología existente en el acuífero le confiere unas características hidráulicas determinadas, mostrando un acuífero con una permeabilidad moderada a baja, que configura un acuífero pobre, algo permeable.

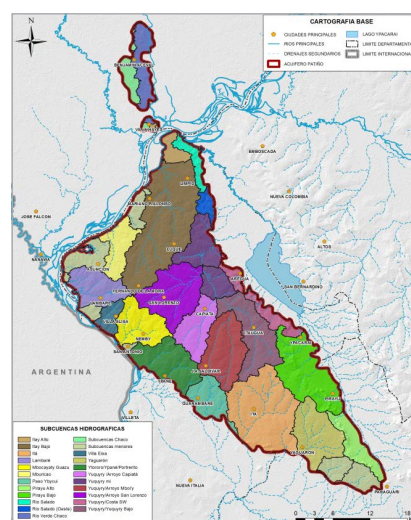
Las piezometrías muestran un comportamiento del flujo que sigue a grandes rasgos a la superficie topográfica y los flujos superficiales. La principal recarga se produce en las zonas altas de las cuencas. Los gradientes hidráulicos muestran una conexión con los principales cursos, y en la mayoría drenan el acuífero convirtiéndose en una zona de descarga natural.

## 5

HIDROGRAFÍA 

La hidrología superficial del área del Patiño se caracteriza por el escurrimiento del agua superficial y sub superficial hacia el río Paraguay al norte y oeste del área; al lago Ypacaraí al este, y hacia el sur al sistema de cauces que drenan al lago Ypoá.

Las principales cuencas hidrográficas son la Cuenca del Arroyo Itay, de unos 170 km<sup>2</sup>, en Asunción y la Cuenca del Arroyo Yukyry, de aproximadamente 338 km<sup>2</sup>, en el sector central del área del acuífero.

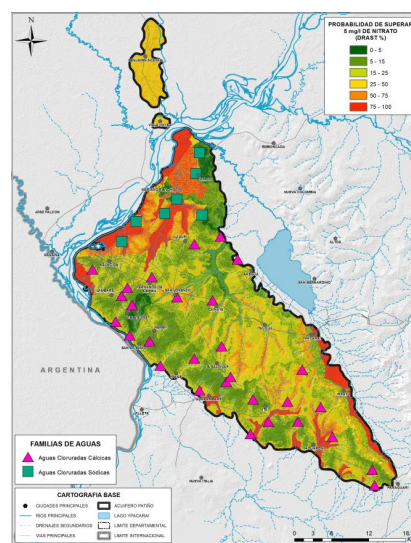


*Las principales cuencas hidrográficas superficiales son el arroyo Itay y el arroyo Yukyry.*

## 6

CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS 

En el acuífero existen dos familias de agua claramente diferenciadas. La más común es la clorurada cálcica, presente en todo el acuífero a excepción de la zona norte y de la zona colindante al río Paraguay, donde predomina la familia clorurada sódica, indicando el origen diferente de éstas.



*Dos familias de agua diferentes indican orígenes diferentes del agua subterránea.*



# 03

## SITUACIÓN ACTUAL DEL ACUÍFERO PATIÑO

---

Balance hídrico.

## BALANCE HÍDRICO

El balance hídrico indica una recarga anual promedio del orden de 259 hm<sup>3</sup>, una explotación por bombeos del orden de 90,8 hm<sup>3</sup>, un drenaje a través de la red hídrica de 136 hm<sup>3</sup> y una salida hacia los aluviales del río Paraguay de 13,7 hm<sup>3</sup>, lo que supone un aumento del almacenamiento en el acuífero cuantificado en 18,4 hm<sup>3</sup> anuales.

## RECARGA

Se ha calculado la recarga para el conjunto del acuífero mediante la aplicación de un modelo de transformación precipitación-escorrentía que proporciona una función de recarga continua en el tiempo y distribuida espacialmente. Esta recarga se ha ajustado y calibrado gracias a la utilización de la separación del hidrograma en la cuenca del arroyo Yukyry, y la calibración del modelo de simulación de flujo del acuífero.

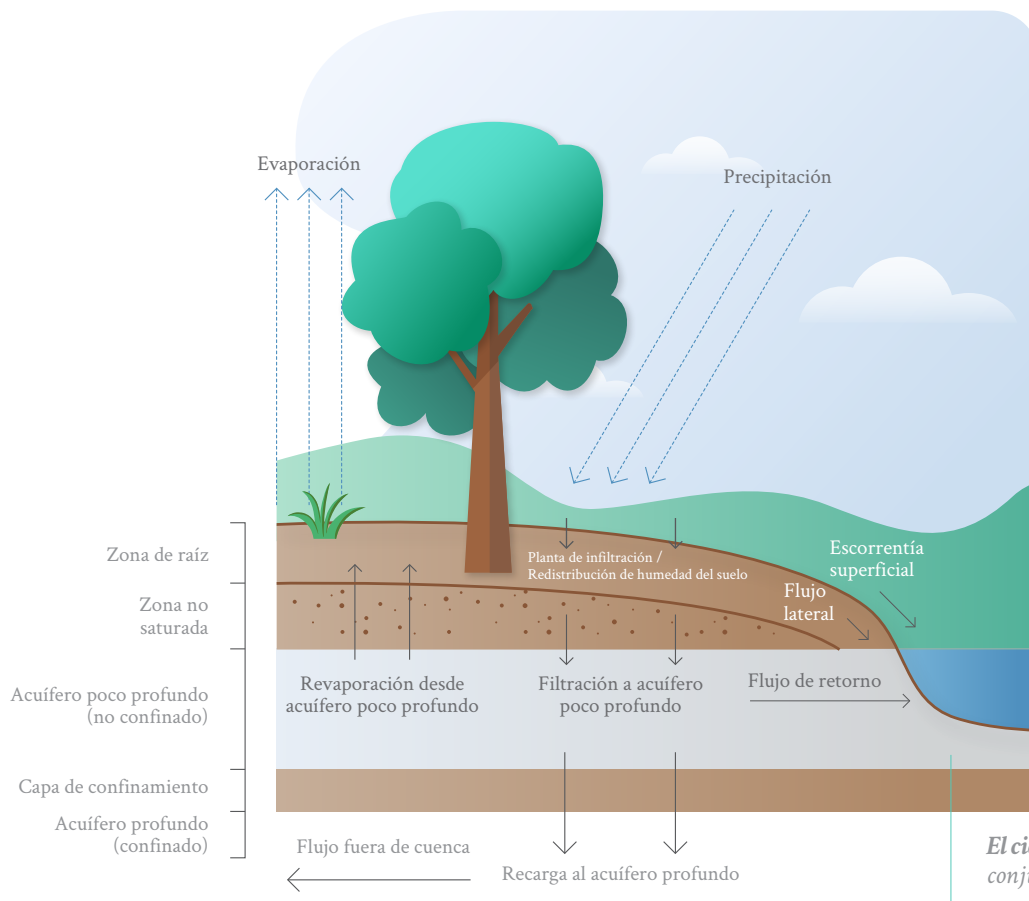
## EXTRACCIONES

Las extracciones se han calculado considerando los caudales nominales registrados a través del inventario realizado. Se obtiene un valor estimado de 90,85 hm<sup>3</sup> anuales.



*Ejemplo de pozo visitado durante el inventario.*

*No se observa desequilibrio entre la recarga y el volumen de extracciones.*



*El ciclo del agua hacia un uso conjunto de los recursos.*

# RECARGA

*{ Infiltración directa de la lluvia, pérdidas de redes de abastecimiento y saneamiento y retornos de riego }*

258,83 HM<sup>3</sup>

Variación de Almacenamiento  
18,4 HM<sup>3</sup>

*Extracciones*

90,85 HM<sup>3</sup>

*Salidas difusas al río Paraguay*

13,69 HM<sup>3</sup>

*Drenajes en ríos y arroyos*

135,89 HM<sup>3</sup>

## PROBLEMAS DE CALIDAD DEL AGUA

El agua del acuífero Patiño se caracteriza por tener un pH con tendencia ácida y conductividades bajas. De baja mineralización, sus propiedades son relativamente homogéneas, distinguiéndose dos tipos de familias de aguas claramente diferenciadas. Por una parte, las cloruradas cálcicas, presentes en casi todo el acuífero, y por otra parte, las cloruradas sódicas, en la zona cercana al Chaco, lo que demuestra un origen diferente de éstas últimas.

### Nitratos

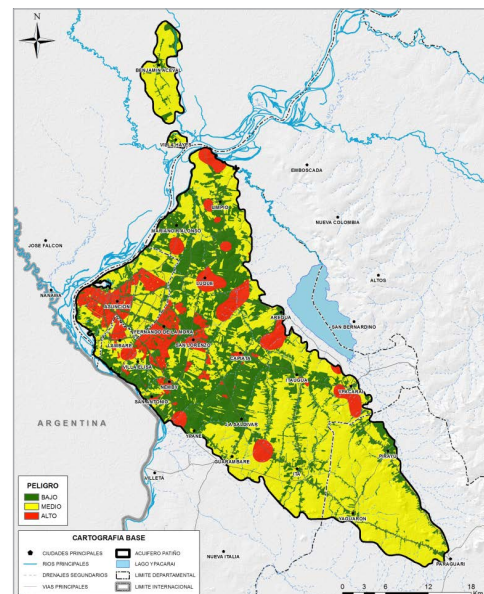
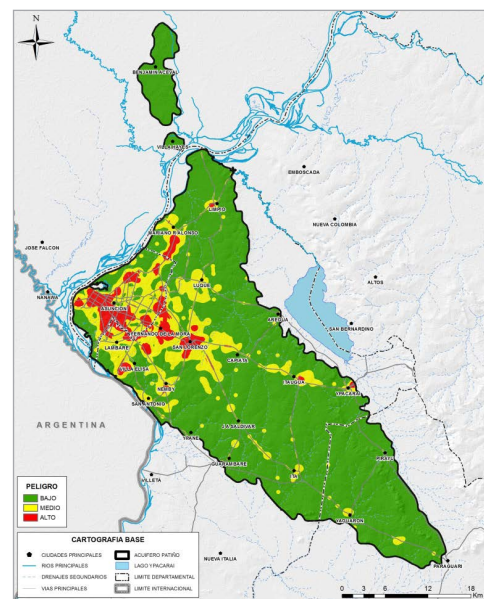
El principal problema detectado en el acuífero Patiño es el aumento de las concentraciones de nitratos, superando el límite máximo permitido en gran parte de los puntos analizados. Las fuertes presiones antrópicas, la expansión de las zonas urbanas y la falta de tratamiento de las aguas usadas podrían ser el origen de este problema.

### Salinidad

La presencia de cloruros y las conductividades más elevadas se dan en la zona de Limpio, Mariano Roque Alonso y Asunción. Los datos analizados no muestran un avance significativo de la cuña salina, aunque la última campaña puso de manifiesto la presencia de aguas de mezcla que indicaría que la salinidad sigue siendo un problema latente aunque no haya aumentado en los últimos años.

*Los nitratos proceden de las actividades antrópicas, agricultura y ganadería y aguas usadas no tratadas.*

*La contaminación por nitratos es uno de los principales problemas que afectan la calidad del agua.*



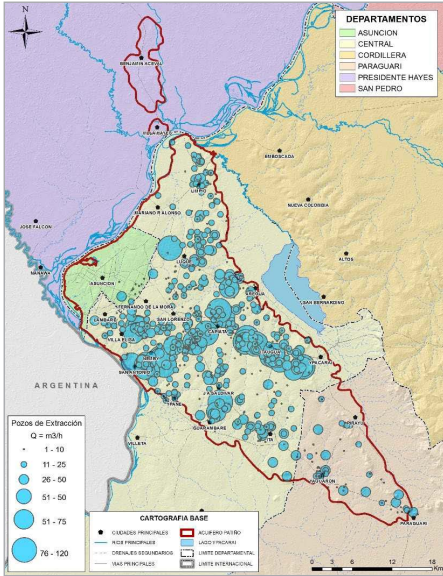


“

*Los análisis realizados no muestran un aumento significativo de los cloruros en el tiempo, no siendo por tanto el problema de calidad más acuciante en la actualidad. Su origen y su evolución debe ser objeto de trabajos futuros de mejora del conocimiento del acuífero.*

”





01

## PRESIONES SOBRE LA CANTIDAD DEL AGUA EN EL ACUÍFERO

Uno de los principales retos a los que se enfrenta el acuífero Patiño es la sobreexplotación.

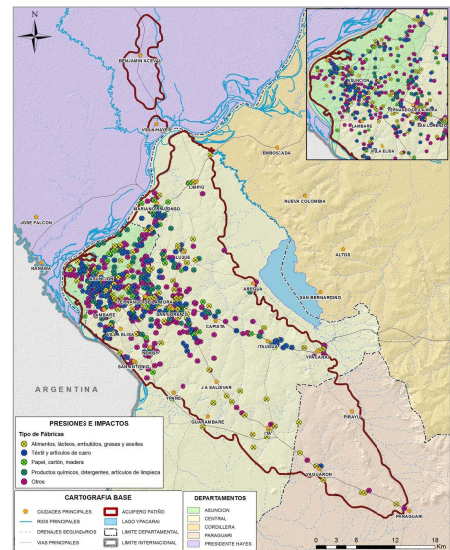
A partir de los datos recopilados, se han identificado aquellas zonas que tenían un mayor volumen de explotación de pozos de agua subterránea. Las mayores extracciones se concentran en el eje San Antonio-Ñemby-San Lorenzo y en el eje Capiatá-Itauguá.

02

## PRESIONES SOBRE LA CALIDAD DEL AGUA EN EL ACUÍFERO

Las presiones cuantitativas se han determinado mediante la identificación de las principales actividades potencialmente contaminantes (fábricas de alimentos, textiles y artículos de cuero, papel, productos químicos, talleres y estaciones de servicio).

Estas actividades se concentran en Asunción y su área metropolitana.

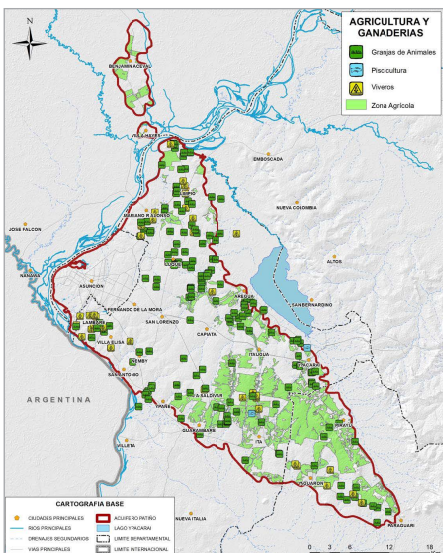


03

## ACTIVIDADES POTENCIALMENTE GENERADORAS DE NITRATOS

Dada la tendencia detectada de aumento de nitratos se ha considerado de relevancia la identificación de aquellas actividades potencialmente generadoras de nitratos.

Para ello, se identifican aquellas zonas urbanas con un deficiente (o inexistente) tratamiento de aguas servidas, y aquellas zonas con actividades agropecuarias.





# 04

## SITUACIÓN FUTURA

---

Escenarios de futuro.



*El Lago Ypacaraí representa uno de los límites de tipo hidráulico del acuífero Patiño.*

Se ha elaborado un modelo numérico de simulación de flujo y transporte de solutos en aguas subterráneas con el software Modflow®. Este programa nos permite simular el comportamiento del acuífero durante un periodo de tiempo en función de los parámetros iniciales que le introducimos.

### *El modelo numérico como herramienta de predicción.*

## ESCENARIOS FUTUROS

Los escenarios son una **herramienta de interpretación** de sistemas complejos, que permiten al observador comprender mejor su funcionamiento y por tanto tomar decisiones de forma adecuada.

Para cada caso se han simulado un conjunto de situaciones combinando diversos parámetros. Las modelaciones ejecutadas simulan los niveles previstos por el modelo numérico a lo largo de 20 años.

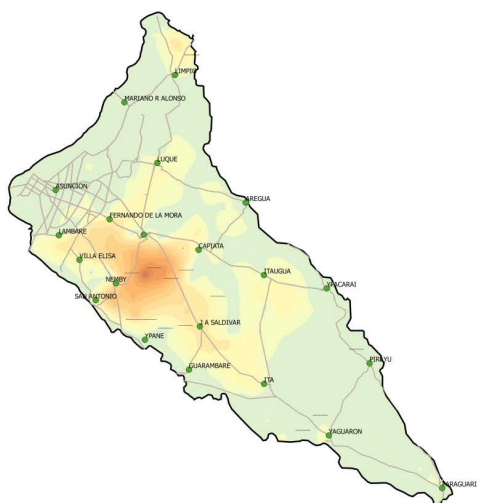
## ESCENARIOS DE SEGUIMIENTO Y CONTROL

Se desarrollan a partir de una batería de hipótesis donde se combinan los dos principales parámetros que rigen la evolución del acuífero: recarga y extracciones.

## ESCENARIOS PROSPECTIVOS

Los escenarios prospectivos parten de un conjunto de variables que son proyectables a futuro desde una base de realidad actual y que determinan de forma fundamental el comportamiento del acuífero.

Se han simulado dos tipos de escenarios prospectivos: considerando la variabilidad climática y el desarrollo socioeconómico y demográfico.



01

## ESCENARIOS DE SEGUIMIENTO Y CONTROL

Este conjunto de escenarios tiene como objetivo poder realizar el seguimiento del acuífero e interpretar lo que está sucediendo. Cualquier variación de los niveles del acuífero podrá ser interpretada en clave de variación de recarga o extracciones.

Los escenarios de sobreexplotación muestran unos niveles de descenso piezométrico bastante altos en la zona de Ñemby, San Lorenzo y Villa Elisa.



“

*El acuífero Patiño no es capaz de soportar la presión en caso de darse un escenario de explotación continua.*

”

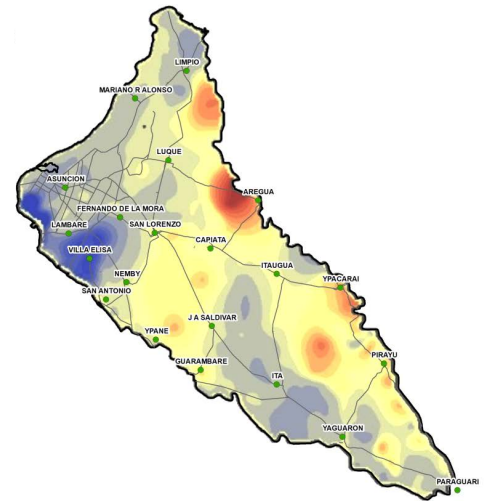
## 02

## ESCENARIOS PROSPECTIVOS CONSIDERANDO VARIABILIDAD CLIMÁTICA

Se ha partido de los datos recogidos de las simulaciones realizadas con el modelo climático regional RCA4, basado en el modelo de predicción climática HIRLAM (Quinto informe del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático - IPCC).

Los resultados muestran una elevada inercia del sistema que es capaz de compensar épocas de menor recarga con otras anteriores donde la recarga ha sido abundante.

*No es de esperar una fuerte incidencia en el nivel cuantitativo del acuífero debido al cambio climático.*



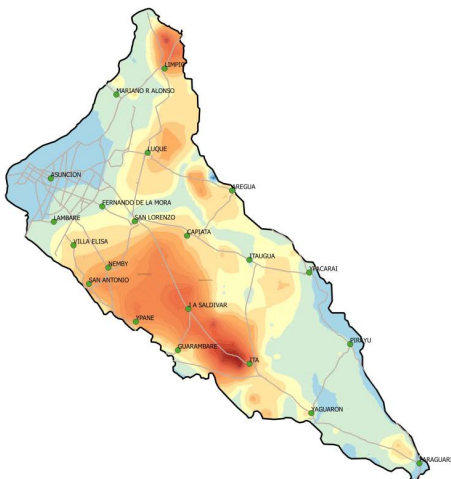
## 03

## ESCENARIOS PROSPECTIVOS CONSIDERANDO DESARROLLO SOCIOECONÓMICO Y DEMOGRÁFICO

El resultado de la simulación nos indica un descenso incompatible con la explotación en todos los escenarios de gestión modelados.

La presión que soporta el acuífero vendrá determinada en gran medida de la gestión que se realice de la utilización del recurso, pero en todos los casos el balance es negativo.

*Todos los casos simulados muestran un descenso incompatible con un aumento de la explotación.*





# 05

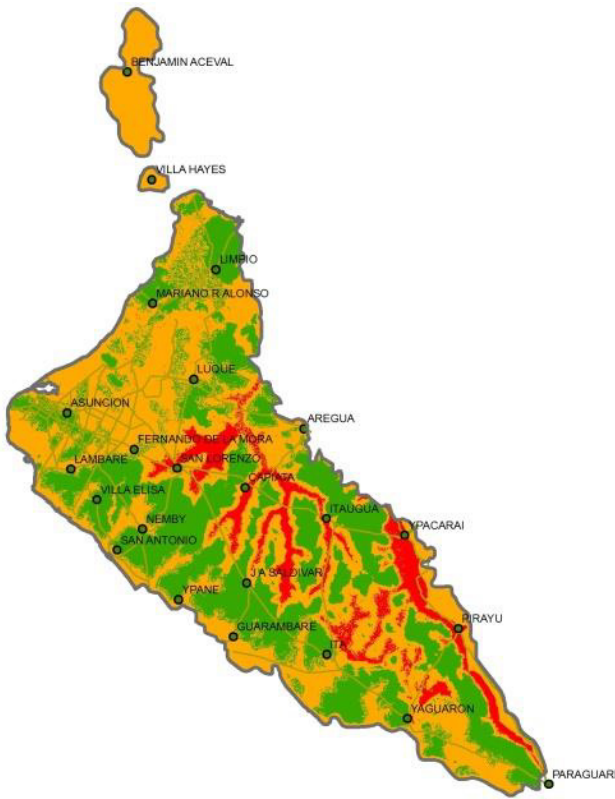
## VULNERABILIDAD Y RIESGO

---

Planificación para la protección  
de las aguas subterráneas.

El concepto de vulnerabilidad es un factor clave en la gestión actual del recurso hídrico y su evaluación debe constituir una de las herramientas básicas para la planificación y toma de decisiones.

*Mapas de vulnerabilidad como herramientas de apoyo a la toma de decisiones.*



## VULNERABILIDAD INTRÍNSECA

Es la sensibilidad propia del acuífero a una cierta acción o forma de acción, atendiendo únicamente a sus características naturales, sin incluir intensidad, oportunidad y aplicación de esta acción.

## VULNERABILIDAD CONSIDERANDO CAMBIO CLIMÁTICO

Es una variante de la vulnerabilidad intrínseca, donde se tienen en cuenta las variaciones de temperatura y precipitación previstas en los informes del IPCC.

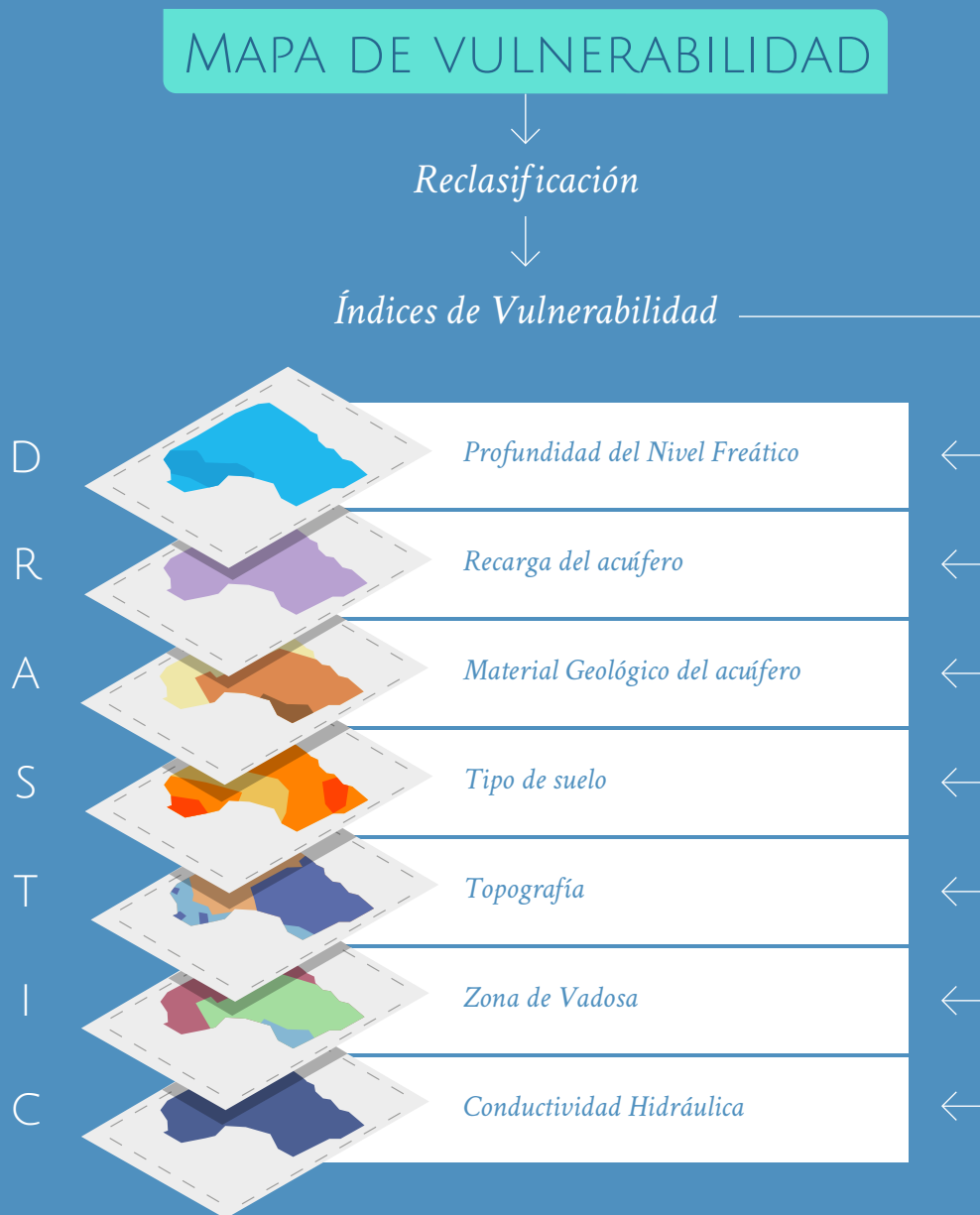
## VULNERABILIDAD ESPECÍFICA AL NITRATO

El concepto de vulnerabilidad específica se refiere a la susceptibilidad del agua subterránea a un contaminante concreto, en función de las características de éstos y sus relaciones con los componentes de la vulnerabilidad intrínseca.

En el caso del Patiño, y debido a su importancia, se ha desarrollado la vulnerabilidad específica al nitrato.



*La red de control está compuesta por 60 puntos que se deben muestrear de forma periódica.*



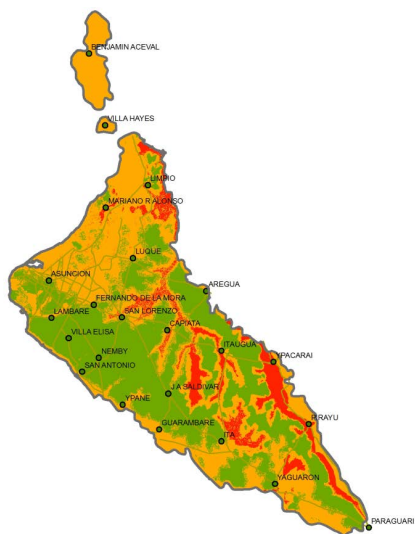
## METODOLOGÍA

Los mapas de vulnerabilidad fueron desarrollados por el método DRASTIC, consistente en el cruce de capas de profundidad del agua subterránea, recarga, litología del acuífero, tipo de suelo, topografía, naturaleza de la zona saturada y conductividad hidráulica.

Se han elaborado 3 tipos de mapas de vulnerabilidad: vulnerabilidad intrínseca, considerando la variabilidad climática y la vulnerabilidad específica al nitrato.

Los datos utilizados en el cálculo DRASTIC proceden de los resultados obtenidos del modelo de flujo (profundidad, recarga, conductividad hidráulica), del modelo digital del terreno (topografía) y de los datos recopilados de los estudios específicos existentes (litología, naturaleza saturada).





01

## VULNERABILIDAD INTRÍNSECA

El resultado obtenido muestra que los parámetros más determinantes son la recarga y la profundidad piezométrica.

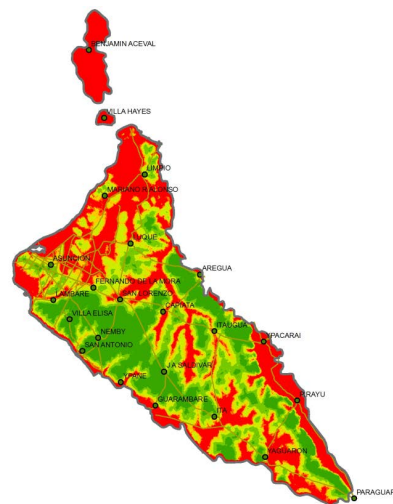
Las zonas de mayor vulnerabilidad corresponden a los cauces y a humedales. Las zonas menos vulnerables son las que presentan una mayor cota.

02

## VULNERABILIDAD CON CAMBIO CLIMÁTICO

Solo varían los parámetros de profundidad piezométrica (D) y recarga (R). El resto son características intrínsecas del acuífero que no varían.

Los resultados muestran una ligera disminución de la vulnerabilidad en la zona de Villa Elisa y Ñemby, zona donde el modelo prevé una disminución de la profundidad piezométrica. El resto del ámbito sigue una tendencia homogénea y no presenta grandes diferencias entre los periodos calculados.

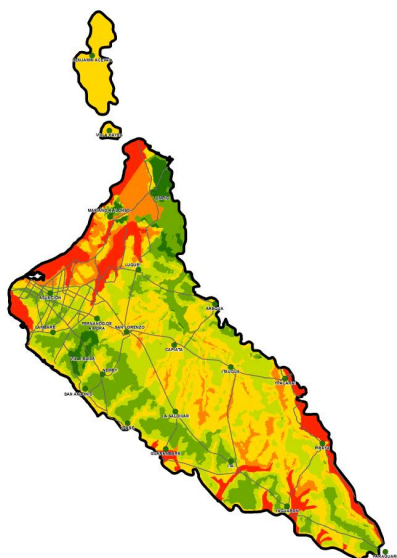


03

## VULNERABILIDAD ESPECÍFICA AL NITRATO

En este caso la metodología utilizada fue un análisis estadístico multivariante, concretamente la regresión logística, donde se generó un modelo explicativo con el objetivo de modelar cómo influye sobre la probabilidad de aparición de un suceso, la presencia o no de diversas variables.

El resultado obtenido han sido mapas de probabilidad de ocurrencia, y como evento de referencia se consideró la probabilidad de superar 5 mg/l de nitrato.





06

# ZONAS DE PROTECCIÓN

---

Controlar y reducir riesgos.

## Zonas de protección para controlar y reducir riesgos.

La zonificación del territorio es la delimitación de zonas de protección o salvaguarda, en las cuales se debe extremar el control de las actividades que pueden impactar de forma negativa sobre la calidad o la cantidad del agua en el acuífero.

### El objetivo:

- ✓ Evitar la degradación del acuífero
- ✓ Garantizar el abastecimiento



La zonificación del acuífero se realiza a partir del cruce de información elaborada en las diversas fases como la delimitación de zonas de recarga, análisis de presiones y mapas de vulnerabilidad.

La metodología utilizada se basa en identificar aquellas zonas con más riesgo, y que por lo tanto, son las zonas que ameritan una mayor protección.

El concepto riesgo se obtiene por el cruce de una capa de vulnerabilidad con una capa de peligros o amenazas (en este caso se trata de las presiones antrópicas en el caso de la calidad y las zonas de más recarga en el caso de la cantidad).



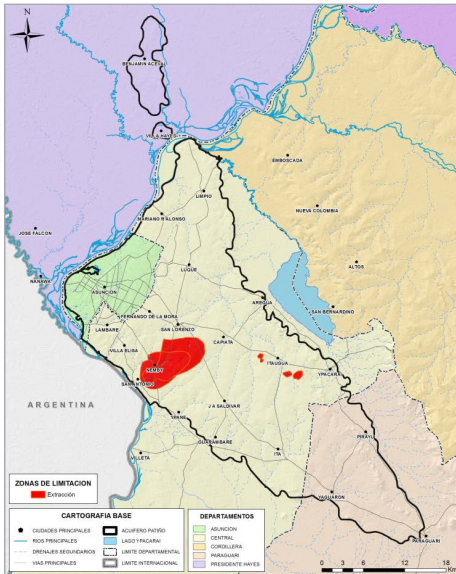
01

## LIMITACIÓN A LA EXTRACCIÓN

En este caso la capa de peligros o amenazas es aquella que indica las zonas de mayor recarga.

La vulnerabilidad utilizada es el resultado del cálculo de la vulnerabilidad intrínseca.

El resultado es un mapa de riesgo donde se señalan aquellas zonas altamente presionadas en las cuales deberían limitarse las nuevas licencias de uso.



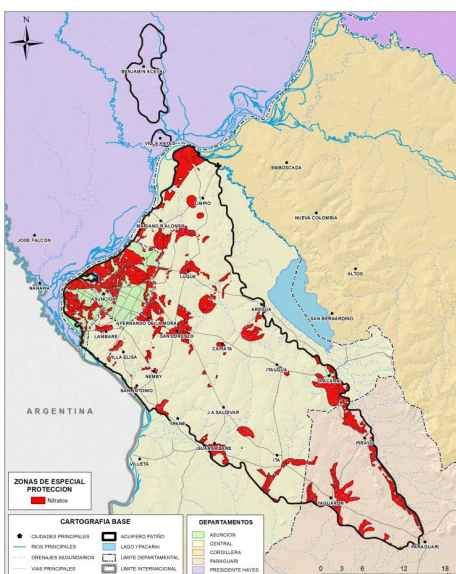
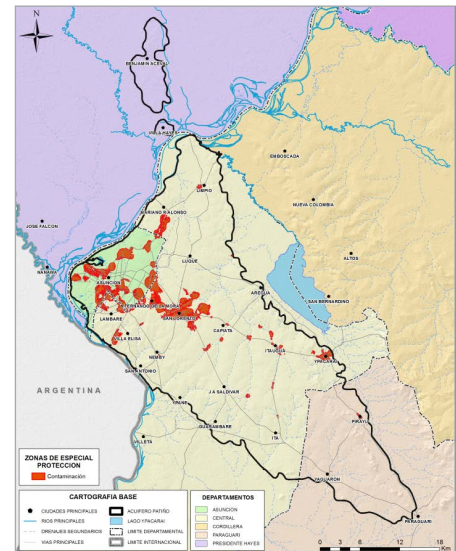
02

## PROTECCIÓN A LA CONTAMINACIÓN

En este caso se considera como peligro o amenaza a aquellas presiones antrópicas conformadas por actividades potencialmente contaminantes (industrias químicas, textil, papeleras, talleres mecánicos, etc.).

La vulnerabilidad es aquella que se obtuvo del análisis DRASTIC del acuífero.

El resultado muestra las zonas en donde se debe dar especial protección a la contaminación, que básicamente se concentran en los principales núcleos urbanos.



03

## PROTECCIÓN ESPECÍFICA A LOS NITRATOS

Las actividades antrópicas potencialmente generadoras de nitratos se consideran como los peligros o amenazas.

La vulnerabilidad es aquella que se calculó a partir del DRASTIC específico a los nitratos.

El resultado muestra que las zonas que necesitan una protección específica para los nitratos se centra en los principales centros urbanos (aguas servidas sin tratamiento) y en las zonas de actividad agropecuaria.



# 07

## DIAGNÓSTICO ESTRATÉGICO

---

Problemática detectada.

El Diagnóstico estratégico se basa en la identificación de problemas y conflictos potenciales a partir de la información recopilada, generada y analizada.

## ÁRBOL DE PROBLEMAS

Para la identificación de los problemas se han elaborado “árboles de problemas”, metodología ampliamente utilizada en planificación y que se basa en la identificación del problema (centro) a través de sus causas (parte inferior) y sus efectos (parte superior). De esta manera es más sencillo identificar los objetivos y las metas a alcanzar para afrontar dichos problemas o conflictos potenciales.

Los problemas que se identifican en este proceso son aquellos que dificultan el uso sostenible del acuífero y ponen en riesgo el derecho de acceso al agua de calidad a una parte importante de la población.

Se han detectado tres problemáticas principales, una de ellas relacionada con la cantidad y las otras dos relacionadas con la calidad.



“

*La principal problemática se debe a la presencia de nitratos,  
posible salinidad y posibles problemas de cantidad.*

”

## PROBLEMAS RELACIONADOS CON LA CANTIDAD DE AGUA

Garantizar el adecuado estado cuantitativo del acuífero es fundamental para el conjunto de la población que actualmente se abastece del agua que extrae del acuífero y que además es su única fuente de agua potable.

Se ha podido observar durante la elaboración de las distintas fases de este estudio cómo los niveles del acuífero en los últimos años se encuentran estabilizados, lo

cual implica un equilibrio entre las entradas y salidas del mismo.

No obstante, existe una depresión apreciable en la zona occidental del acuífero en los municipios de Lambaré, Fernando de la Mora o Ñemby, entre otros. En esta región se localizan las extracciones más importantes del acuífero.



*Descensos del agua muy importantes en los pozos que provoca un aumento del gasto energético.*



*Riesgo de restricciones de agua en esta región debido a una inadecuada gestión.*



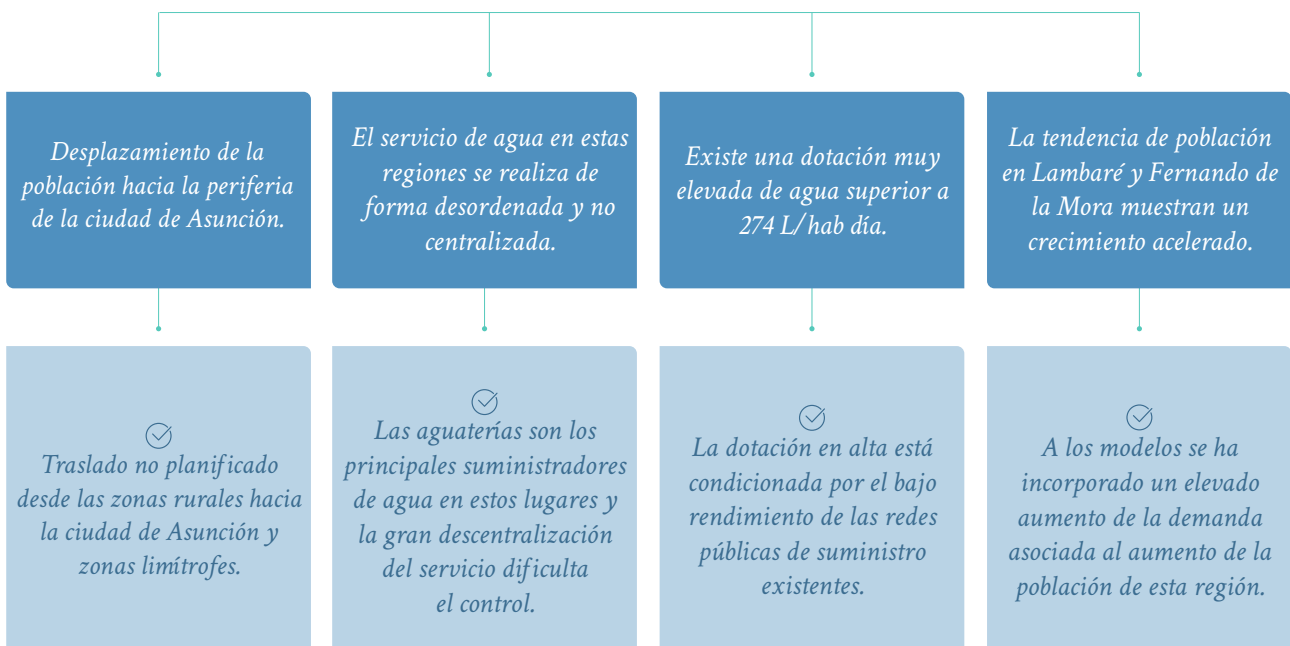
*Aumento del coste del agua en esta zona.*



*Los escenarios simulados mediante los modelos numéricos muestran que los descensos se intensificarán.*

### LA DEPRESIÓN DE NIVELES SE CONCENTRAN EN LA REGIÓN NORESTE DEL ACUÍFERO

(Lambaré, Fernando de la Mora o Ñemby)



## PROBLEMÁTICA RELACIONADA CON NITRATOS Y PATÓGENOS

Se han detectado concentraciones muy elevadas de nitratos en gran parte de los puntos analizados durante el segundo trabajo de campo (agosto 2018), valores que en gran parte de los casos superan los detectados en analíticas anteriores. Adicionalmente, se detecta presencia de contaminación microbiológica (coliformes y Escherichia Coli) en algunos de los puntos.

Este es un problema relacionado con la elevada presión antrópica que está sufriendo el acuífero, donde se aprecia una inadecuada gestión de las aguas residuales urbanas. La poca eficiencia de las redes de saneamiento existentes, sumadas a la utilización progresiva de antiguos pozos como zonas de vertidos de aguas sucias, está provocando una continua degradación del acuífero, pudiendo poner en riesgo esta fuente estratégica de abastecimiento de agua en el futuro.



*Inseguridad hídrica y  
problemas de salud.*



*Impacto ambiental y  
degradación del acuífero.*



*Impacto económico.*

### AUMENTO DE LA CONCENTRACIÓN DE NITRATOS Y PATÓGENOS





## PROBLEMÁTICA RELACIONADA CON LA SALINIZACIÓN DEL AGUA

La salinidad del acuífero es un problema que ha suscitado una gran preocupación para los gestores del acuífero de forma histórica.

Los resultados del modelo de transporte arrojaron que la opción más plausible es aquella en la que el agua salina es congénita a la formación del acuífero, siendo posible que esta agua salinizada se encuentre en profundidad en buena parte de la formación, aflorando

en las zonas de borde del acuífero, concretamente en el norte del acuífero, donde este descarga al río Paraguay.

Después del análisis de los últimos resultados se han detectado pequeñas anomalías que ponen de manifiesto la existencia de salinidad y, aunque no suponga un problema excesivamente grave por el momento, se debe resaltar la necesidad de revertir la tendencia.

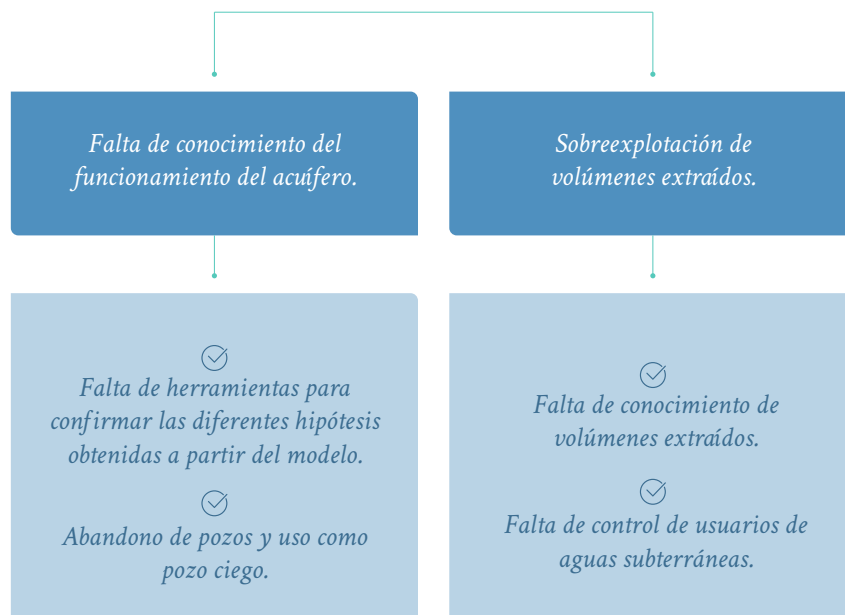


*Inseguridad hídrica y problemas de salud.*



*Impacto económico.*

## SALINIZACIÓN DE POZOS DE LA REGIÓN NORTE DEL ACUÍFERO





# 08

## LÍNEAS DE ACCIÓN

---

Construyendo el Plan  
Estratégico de acción.

La aplicación de las acciones necesarias para poder revertir o paliar los problemas detectados se materializa en el Plan de Acción estratégico.

En base a la problemática detectada se proponen una serie de líneas estratégicas de acción que permitan en la medida de lo posible dar respuesta a los objetivos planteados.

## LÍNEAS ESTRATÉGICAS DE ACCIÓN

Se han definido 5 líneas de acción. Por una parte, una serie de líneas de acción que dan respuesta a los principales problemas detectados en las fases anteriores del estudio:

✓ *Gestión integrada de los recursos hídricos.*

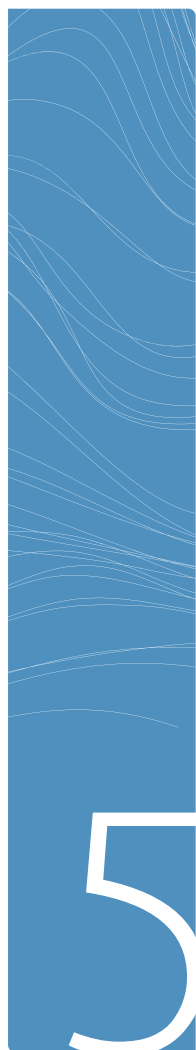
✓ *Preservación de la calidad del agua y reducción de la vulnerabilidad.*

Por otra parte, se definen otras líneas de acción que aportan soluciones de manera transversal a los problemas mencionados:

✓ *Institucionalidad.*

✓ *Cultura del agua.*

✓ *Financiamiento de la gestión del agua.*



### 1. GESTIÓN

integrada de los recursos hídricos.

### 2. PRESERVACIÓN

de la calidad del agua y reducción de vulnerabilidad.

### 3. FORTALECIMIENTO

institucional.

### 4. CULTURA

del agua.

### 5. FINANCIAMIENTO

en la gestión del Agua.

*Las líneas de acción componen  
el Plan Estratégico de acción.*



## GESTIÓN INTEGRADA DE LOS RECURSOS HÍDRICOS

Incluye todas aquellas actuaciones que van a dar respuesta al principal problema detectado en cuanto a la cantidad, como es la depresión de niveles localizados en la zona noroeste del acuífero Patiño.

Sus programas se basan en la vigilancia, seguimiento y control, conocimiento del recurso y coordinación con otras instituciones.



## PRESERVACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA Y REDUCCIÓN DE LA VULNERABILIDAD

Incluye todas aquellas actuaciones que van a ayudar a la preservación de la calidad del agua subterránea y a contribuir a la reducción de la vulnerabilidad del acuífero. Todas ellas responden a la problemática detectada debido al aumento de nitratos y patógenos y a la problemática de salinización natural del acuífero.

Su principal objetivo es el establecimiento de zonas de protección para las aguas subterráneas.



## FORTALECIMIENTO DE LA INSTITUCIONALIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DEL PLAN

Esta línea responde de manera transversal a los problemas detectados, ya que el éxito de las actuaciones propuestas depende de una institucionalidad fuerte que sea capaz de articular a los diferentes actores y de llevar a cabo una adecuada gestión integrada de los recursos hídricos.

Integra la formalización de usuarios de agua subterránea y el fortalecimiento de las autoridades responsables de la gestión del agua.

## 4

## CULTURA DEL AGUA

Línea base transversal a las diferentes problemáticas detectadas que debe contribuir a llevar a cabo las diferentes actuaciones propuestas.

Incluye programas de cultura del agua y su objetivo deberá ser la promoción y divulgación del conocimiento del acuífero Patiño.

## 5

## FINANCIAMIENTO

El financiamiento es un aspecto clave necesario para la implementación de todas aquellas medidas propuestas. Sin este aspecto la gestión del agua no puede ser sostenible y se dificulta en gran medida las posibilidades de éxito.

Su principal objetivo es la sustentabilidad económica para la gestión del recurso.



*Mediante la implementación del Plan Estratégico de Acción se fomentará la preservación y conservación de las aguas superficiales y subterráneas en el área de influencia del acuífero Patiño.*



# 09

## TRANSFERENCIA DEL CONOCIMIENTO

---

Herramienta de  
continuidad del Plan.

La transferencia del conocimiento es el proceso por el cual la información generada y los resultados de los estudios fluyen entre las partes interesadas. Es una herramienta clave para la continuidad de los trabajos iniciados y para que el Plan generado siga su camino.

Por ello, durante todas las etapas de la elaboración se han ido realizando reuniones, talleres y exposiciones con los diferentes actores involucrados. Adicional-

mente se les ha proporcionado licencias del software utilizado para modelización, así como copias del software libre usado en las diferentes fases del proyecto y toda la documentación de base que ha sido empleada.

El objetivo es, no solo compartir los avances y socializar los resultados, sino que los actores se hagan partícipes del Plan desde sus inicios y que esto facilite el proceso posterior de seguimiento del Plan.

### *El papel clave de los actores locales para la continuidad del Plan generado.*



*Taller de presentación del Plan de Monitoreo y capacitación de toma de muestras en campo.*



# 10

## CONCLUSIONES

---



01

La gestión y buen gobierno del acuífero presenta un conjunto de dificultades debido a la ausencia de una cultura relacionada con la gestión del agua y la existencia de multitud de entidades públicas y privadas que inciden en la gestión del agua dificultando una actuación coordinada que persiga objetivos comunes.

02

La litología existente en el acuífero le confieren unas características hidráulicas determinadas, mostrando un acuífero con una permeabilidad moderada a baja, que configura un acuífero pobre, algo permeable.

03

Las piezometrías elaboradas muestran un comportamiento del flujo que sigue a grandes rasgos a la superficie topográfica y los flujos superficiales, la principal recarga se produce en las zonas altas de las cuencas que se encuentran en la superficie del acuífero. Los gradientes hidráulicos muestran una conexión con los principales cursos, y en la mayoría drenan el acuífero convirtiéndose en una zona de descarga natural.

04

En base a los datos de nivel piezométricos registrados durante los últimos 10 años en la red de control del Ministerio del Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADES), se ha podido comprobar como los niveles se han mantenido prácticamente constantes con una ligera tendencia a ascender. En base a este mismo análisis se comprueba una relación entre la precipitación y la evolución de los niveles, mostrando el importante papel que juega la recarga por infiltración de agua de lluvia.

05

El área del acuífero Patiño es una zona altamente urbanizada donde existe una gran presión antrópica con una tipología muy variada de potenciales fuentes de contaminación. Las presiones antrópicas se concentran principalmente en las áreas urbanas: Asunción, Lambaré, Fernando de la Mora, Mariano R. Alonso, Luque. La falta de planes de ordenamiento territorial hace difícil el conocimiento y control de dichas presiones.

06

El balance hidrogeológico se realizará en una fase posterior cuando se determinen en base al modelo hidrológico los ingresos de agua en el acuífero mediante la generación de un modelo hidrológico de transformación lluvia – escorrentía. El resto de variables que intervienen en el balance de agua se estiman en base a las presiones sobre la cantidad de agua que sufre el acuífero. De esta forma se obtiene el volumen de agua que se extrae de forma anual para satisfacer la demanda relacionada con los diferentes tipos de usos de suelo. También se tiene en consideración el volumen de agua que es aportado al acuífero como consecuencia de la transferencia que se produce desde el río Paraguay a través de las pérdidas de la red de distribución de agua potable y saneamiento. La incertidumbre asociada a la obtención de estos datos obligará a realizar un proceso de calibración para comprobar su grado de confiabilidad.

07

El diagnóstico realizado a la red de control piezométrica muestra que solamente 30 de los 46 piezómetros que la componen están en funcionamiento. 13 de ellos no están operativos al estar obstruidos por basura y/o raíces. Los 3 restantes han desaparecido. Se considera un factor clave la recuperación de dichos puntos de control para realizar el seguimiento y evolución de la cantidad y calidad del agua subterránea.

08

Por último se ha revisado el modo en que la información recopilada es considerada en el proceso de generación del modelo de simulación. En ese sentido, se puede concluir que en base a los datos recopilados es posible construir de forma adecuada este modelo, aunque los resultados obtenidos estarán sujetos a una elevada incertidumbre debido a la cantidad y confiabilidad de la información de entrada disponible. Por este motivo se construirá el modelo con el objetivo que sea lo más simple posible y que permita recoger de forma adecuada el comportamiento del acuífero. A su vez el modelo deberá permitir una adecuada interpretación y una sencilla actualización que permita reducir el grado de incertidumbre que en estos momentos se tiene.

## REFERENCIAS

European Commission (2007). Common Implementation Strategy for the Water Framework Directive.

---

Global Water Partnership (2000). Integrated Water Resources Management.

---

Jakeman, A.J., Barreteau, O., Hunt, R.J., Rinaudo, J.D., Ross, A. (2016). Integrated Groundwater Management – Concepts, Approaches and Challenges.

---

Ross, A. (2012). Water Connecting, People Adapting: Integrated surface water and groundwater management in the Murray-Darling Basin Colorado and Idaho.

---



