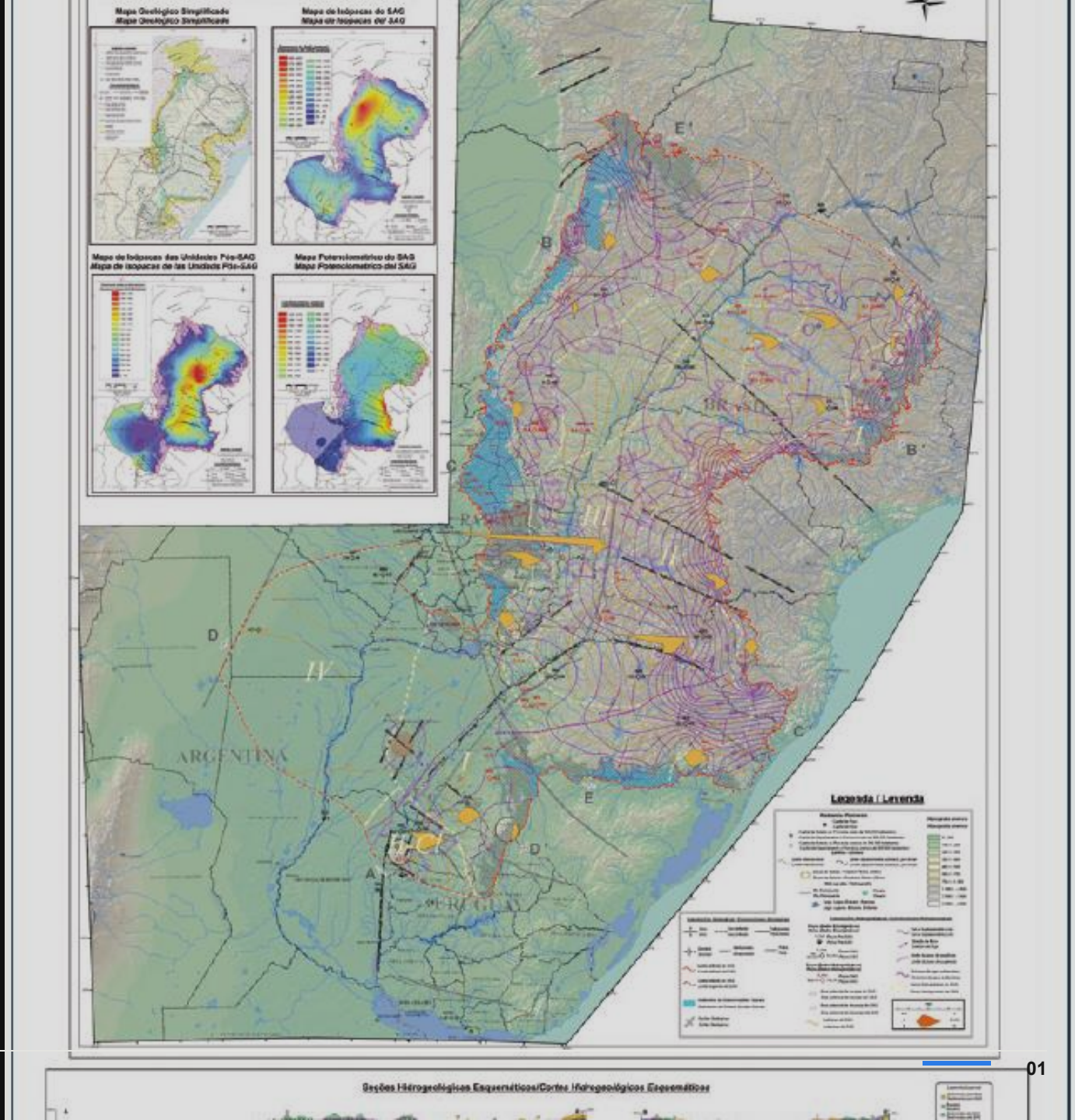
# SAG

INGENIERÍA GEOLÓGICA Y GEOTÉCNICA

# Sistema Acuífero Guaraní

Geología, funcionamiento y gestión
Enfoque para ingeniería y Misiones

Dr. Ing. Gustavo O. Bogado
Mgter Hugo O. Reinert
Ing Marcelo Gross




Fuentes: Proyecto SAG; COHIFe

RECORRIDO

# Contenido de la clase

**01**

## Geología

Extensión regional y rocas que alojan el agua subterránea.

**02**

## Funcionamiento

Recarga, circulación, confinamiento y respuesta al bombeo.

**03**

## Aprovechamiento

Calidad del agua, abastecimiento y usos termales.

**04**

## Gestión

Protección de pozos, monitoreo y cooperación entre países.

**Pregunta guía: ¿qué información necesita un proyecto para captar agua del SAG de manera sostenible?**

Fuentes: Proyecto SAG; SGB; UNESCO (2026)

CONCEPTO

# Qué es el Sistema Acuífero Guaraní

## Un medio geológico permeable

- Las areniscas almacenan agua en sus poros y la transmiten entre sectores conectados.
- La porosidad describe el espacio disponible. La permeabilidad controla la circulación.
- El nombre «sistema» reconoce diferencias de litología, geometría y continuidad.

## Una unidad regional heterogénea

- Comprende sectores libres y otros cubiertos por basaltos u otras unidades.
- Las fracturas, fallas y cambios de facies modifican las conexiones hidráulicas.
- Cada captación requiere conocer su unidad acuífera y las condiciones locales.

**El agua ocupa poros y discontinuidades de la roca. Su disponibilidad depende del lugar.**

Fuentes: Servicio Geológico do Brasil; COHIFe

# Ubicación y extensión regional

## ≈1,09 millones de km²

- Se extiende bajo partes de Argentina, Brasil, Paraguay y Uruguay.
- La delimitación sigue unidades geológicas y condiciones hidrogeológicas.
- La superficie representa el área del sistema, no una superficie de agua libre.




Mapa del proyecto PPM Guaraní. Delimitación regional de referencia.

Fuentes: Proyecto regional del Sistema Acuífero Guaraní

# Distribución de la superficie por país

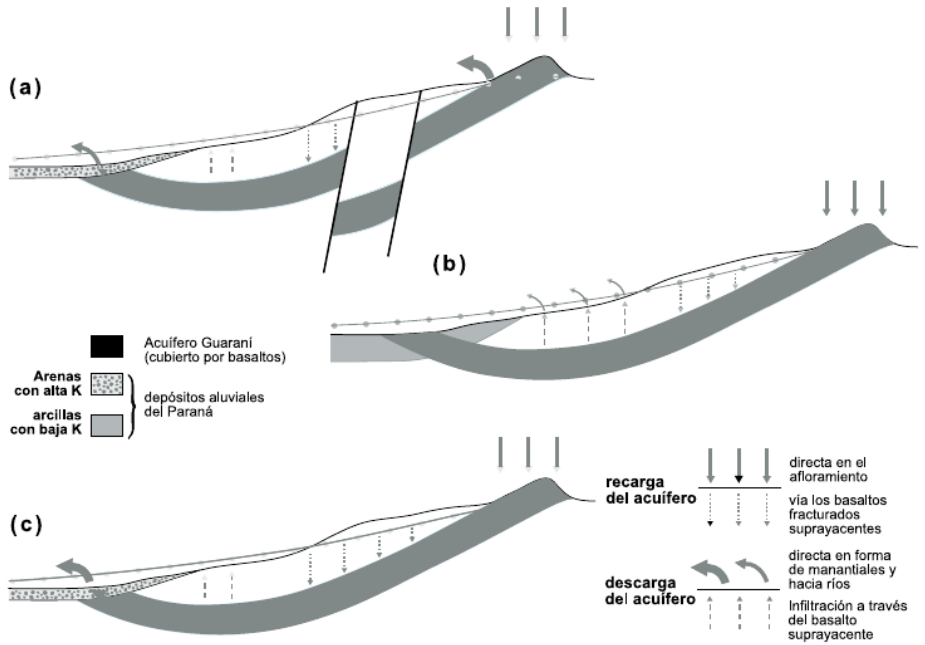
| País | Superficie del SAG (km²) | Participación (%) |
|---|---|---|
| Argentina | 228.255 | 21,0 |
| Brasil | 735.918 | 67,6 |
| Paraguay | 87.536 | 8,1 |
| Uruguay | 36.170 | 3,3 |
| Total | 1.087.879 | 100,0 |

**Las cifras dependen de la delimitación utilizada. Las estimaciones históricas pueden diferir.**

Fuente: Tabla del proyecto PPM Guaraní

# Areniscas acuíferas y cobertura basáltica

**Figura 2: Secciones transversales hipotéticas del Sistema Acuífero Guaraní que muestran una perturbación potencial tectónica significativa y característica de la cubierta aluvial del Paraná para controlar el régimen de descarga**




Secciones hipotéticas del sistema. Banco Mundial, 2004.

## La arquitectura geológica condiciona el funcionamiento

- El principal reservorio comprende areniscas mesozoicas de distinta génesis.
- Los basaltos cretácicos cubren grandes extensiones del sistema.
- El espesor y la continuidad de la cobertura varían regionalmente.
- Las discontinuidades pueden favorecer o limitar la conexión entre unidades.

Fuentes: SGB; RIMAS (2021); imagen: Banco Mundial (2004)

# Unidades geológicas del sistema

| Región | Unidades principales | Observación |
|---|---|---|
| Brasil | Botucatu y Pirambóia | Variación regional de facies |
| Argentina y Paraguay | Formación Misiones | Areniscas acuíferas |
| Uruguay | Formación Tacuarembó | Unidades arenosas |
| Cobertura regional | Basaltos de Serra Geral y equivalentes | Confinamiento variable |

**La correlación regional no implica que todos los estratos tengan la misma capacidad de producir agua.**

Fuentes: COHIFe; Servicio Geológico do Brasil; RIMAS (2021)

# Recarga, circulación y descarga

**01**

## Recarga

Parte de la lluvia alcanza el acuífero en afloramientos y sectores conectados.

**02**

## Ingreso

El suelo y la zona no saturada regulan el tránsito del agua y los solutos.

**03**

## Circulación

El agua fluye según diferencias de carga hidráulica y permeabilidad.

**04**

## Descarga

El sistema entrega agua a drenajes naturales y a captaciones.

**La conectividad y las tasas de renovación requieren evaluación local.**

Fuentes: COHIFe; Simon et al. (2017); SGB

# Recarga y conexión con la superficie

## Áreas de afloramiento

- La lluvia puede infiltrar directamente hacia las unidades arenosas.
- El suelo, la vegetación y la posición topográfica influyen en la infiltración.
- La recarga cambia entre sitios y entre períodos climáticos.

## Sectores bajo cobertura

- La recarga indirecta depende de la continuidad hidráulica de las unidades.
- Fracturas y pozos pueden establecer rutas de conexión con otros niveles.
- La precipitación sobre la superficie no equivale automáticamente a recarga profunda.

**Una tasa medida en un sector de afloramiento no representa por sí sola todo el SAG.**

Fuentes: Simon et al. (2017); SGB; COHIFe

# Sectores libres y confinados

## Acuífero libre

- El nivel freático limita la zona saturada y está a presión atmosférica.
- La lluvia y el bombeo pueden generar respuestas locales apreciables.
- El contacto con la superficie aumenta la exposición a contaminantes.

## Acuífero confinado

- La cobertura restringe el intercambio directo con la superficie.
- El nivel piezométrico puede ubicarse por encima del techo del acuífero.
- La surgencia ocurre cuando esa carga supera la cota del terreno.

**El confinamiento describe una condición hidráulica. La termalidad describe la temperatura.**

Fuentes: USGS; COHIFe; SGB

# Parámetros para evaluar una captación

CONDUCTIVIDAD

## K (m/d)

Capacidad del medio para transmitir agua bajo un gradiente hidráulico.

TRANSMISIVIDAD

## $T = K \cdot b$ (m²/d)

Integra la conductividad y el espesor saturado b en una unidad homogénea.

ALMACENAMIENTO

## S (adimensional)

Volumen liberado por unidad de área y cambio de carga hidráulica.

RESPUESTA DEL POZO

## Q y abatimiento s

Un ensayo de bombeo registra caudal, descenso de nivel y recuperación.

Fuentes: USGS, Barlow y Leake (2012); Barlow y Moench (1999)

# Agua almacenada y disponibilidad de extracción

## Almacenamiento regional

- Las estimaciones de volumen dependen del área, espesor y porosidad adoptados.
- La reserva incluye agua con distinta calidad y tiempo de residencia.
- Parte del recurso permanece en sectores profundos y de renovación lenta.

## Disponibilidad para un proyecto

- La extracción modifica niveles y gradientes en el entorno de la captación.
- Los límites de explotación dependen de la respuesta del sistema y de los usos.
- El caudal de operación requiere ensayos, evaluación de interferencias y monitoreo.

**Una reserva regional grande no determina el caudal sostenible de un pozo.**

Fuentes: SGB; USGS; COHIFe

# Calidad del agua y evolución hidroquímica

## Composición natural

- La interacción entre agua y roca modifica los iones disueltos durante el flujo.
- Se reconocen distintas facies hidroquímicas entre sectores del sistema.
- La salinidad y otros constituyentes pueden limitar determinados usos.

## Evaluación para el uso previsto

- El análisis debe incluir parámetros químicos y microbiológicos pertinentes.
- La conductividad eléctrica ayuda a seguir cambios de mineralización.
- La aptitud para consumo, riego, industria o termalismo exige criterios específicos.

**La potabilidad requiere verificar la calidad de cada captación.**

Fuentes: Invernizzi y Oliveira (2012); SGB; UNESCO (2026)

TEMPERATURA Y USOS

# Aprovechamiento termal

ORIGEN DEL CALOR

## Profundidad y geotermia

El calor de la corteza eleva la temperatura del agua en sectores profundos.

VARIABLE DE DISEÑO

## Temperatura en el pozo

La temperatura y el caudal se miden en cada captación y durante la operación.

USO REGIONAL

## Turismo hidrotermal

Concordia, Federación y Colón son ejemplos argentinos citados por COHIFe.

GESTIÓN DEL APROVECHAMIENTO

## Calidad y descarga

La composición del agua y el manejo del efluente condicionan el proyecto.

Fuentes: COHIFe; Servicio Geológico do Brasil

# Usos del Sistema Acuífero Guaraní

## El uso depende de la calidad y de las condiciones locales

- Abastecimiento público y consumo humano.
- Procesos industriales y usos agrícolas.
- Turismo y recreación en centros termales.
- En Misiones, COHIFe cita el abastecimiento público de Cerro Azul.




Infografía del proyecto PPM Guaraní.

Fuentes: Proyecto PPM Guaraní; COHIFe

# Vulnerabilidad y riesgo de contaminación

## Fuentes potenciales de carga

- Efluentes urbanos y sistemas de saneamiento deficientes.
- Fertilizantes, agroquímicos e instalaciones de almacenamiento.
- Vertidos, residuos y actividades ubicadas en sectores vulnerables.

## Vías de ingreso

- Infiltración a través de suelos y unidades acuíferas expuestas.
- Conexiones por fracturas y por perforaciones mal selladas.
- Mezcla entre niveles de distinta calidad durante la explotación.

**El riesgo combina la vulnerabilidad hidrogeológica con la carga contaminante de la actividad.**

Fuentes: Manuales técnicos del SAG; SGB

# Efectos del bombeo y presión sobre el recurso

## Respuesta hidráulica

- La extracción produce abatimiento alrededor del pozo.
- Captaciones cercanas pueden interferir entre sí.
- El bombeo puede modificar el intercambio con cursos de agua conectados.

## Información para gestionar

- Caudal y horas de funcionamiento de cada captación.
- Niveles estáticos, dinámicos y recuperación después del bombeo.
- Series de calidad y respuesta de puntos de observación.

**La respuesta depende de la geometría, las propiedades hidráulicas y los límites del sistema.**

Fuentes: USGS, Barlow y Leake (2012); Barlow y Moench (1999)

# Proyecto y construcción de pozos

**01**

## Exploración

Modelo hidrogeológico, antecedentes, geofísica y profundidad objetivo.

**02**

## Construcción

Entubado, filtros y sellos que aíslen niveles de distinta calidad.

**03**

## Evaluación

Desarrollo, ensayos de bombeo, recuperación y análisis del agua.

**04**

## Operación

Registro de extracción, mantenimiento y cierre seguro al finalizar el uso.

**La integridad de la perforación forma parte de la protección del acuífero.**

Fuentes: Manual de perforación de pozos del SAG; USGS

GESTIÓN LOCAL

# Medidas de protección de las captaciones

EMPLAZAMIENTO

## Entorno sanitario

Evaluación de focos contaminantes y protección del área próxima al pozo.

HIDROGEOLOGÍA

## Perímetro de protección

Delimitación con flujo, tiempos de tránsito y vulnerabilidad del sitio.

INFRAESTRUCTURA

## Sellos y cabezal

Control de vías de ingreso directo y aislamiento de niveles no captados.

SEGUIMIENTO

## Monitoreo y respuesta

Mediciones periódicas y acciones frente a cambios de nivel o de calidad.

Fuentes: Manuales técnicos del Sistema Acuífero Guaraní

# Acuerdo internacional y planificación regional

## Acuerdo sobre el Acuífero

- Argentina, Brasil, Paraguay y Uruguay firmaron el acuerdo en 2010.
- Entró en vigor el 26 de noviembre de 2020.
- Prevé cooperación, intercambio de información y prevención de perjuicios.

## Plan de Acciones Estratégicas

- Los países aprobaron la actualización del PAE en 2025.
- El plan reúne 8 programas y 25 acciones estratégicas.
- La aplicación articula instituciones nacionales y jurisdicciones locales.

**El acuerdo preserva la soberanía de cada país sobre su porción del recurso.**

Fuentes: Acuerdo SAG; COHIFe; Argentina.gob.ar; UNESCO (2025)