

## Evaluación de la recarga potencial en el municipio de Guanajuato: período de lluvias 2024

Evaluation of potential recharge in the municipality of Guanajuato: rainy period 2024

Karen Aurora Palacios Alvarado<sup>1</sup>, Luis Derek Alejandro Lopez Alarcon<sup>2</sup>, Ivan Alejandro Cervantes Esquivel<sup>3</sup>, Yann René Ramos Arroyo<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Campus Guanajuato - División De Ingenierías - Licenciatura En Ingeniería Ambiental

<sup>2</sup> Campus Guanajuato - División De Ciencias Naturales Y Exactas - Licenciatura En Química

<sup>3</sup> Campus Guanajuato - División De Ingenierías - Licenciatura En Geografía

<sup>4</sup> Campus Guanajuato- División de Ingenierías- Departamento de Ingeniería Geomática e Hidráulica

Yr.ramos@ugto.mx

### Resumen

El objetivo de este trabajo fue realizar una estimación del volumen que potencialmente podría recargarse hacia los acuíferos del municipio de Guanajuato durante el periodo de la realización del proyecto del verano de investigación en el año 2024. Se utilizó una aproximación de un balance hídrico en la cuenca del río Guanajuato-Purísima. Se contrastaron los datos de la lluvia normal de junio y julio del periodo 1960-2000 de seis estaciones meteorológicas de la CONAGUA, con los datos de los meses de junio y julio del 2024 que arrojarón estaciones meteorológicas en línea. Se describieron las condiciones de sitios que pueden dar información sobre la recarga, tales como pozos someros y manantiales, se analizaron los aniones en cada muestra y se aplicó el método de balance de cloruros para evaluar la recarga. La cantidad de lluvia que cayó en la cuenca el mes de junio fue de 98.72 millones de metros cúbicos ( $Mm^3$ ) y en julio fue de 109.62  $Mm^3$ . Estos números exceden los datos normales en 1.5 y 1.2 veces para junio y julio respectivamente. Los datos reflejan que los manantiales en medio fracturado pueden recargar del 25 al 36 % de la lluvia total y los pozos en los medios sedimentarios pueden recibir la recarga del 4 al 8 % de la lluvia total.

**Palabras clave:** Balance hídrico, lluvias estacionales, método de cloruros, firma de aniones, recarga.

### Introducción

El volumen de recarga anual se refiere a la cantidad de agua de lluvia que entra durante un determinado periodo. Con el fin de realizar una adecuada gestión del recurso agua, es fundamental el conocimiento de los procesos hidrológicos en las cuencas: la evaporación, el escurrimiento y la infiltración. Cada cuenca tiene un patrón de comportamiento específico que depende de los factores geomorfología, geología y las dinámicas atmosféricas. Es muy importante aplicar algún método que permita derivar el porcentaje de lluvia que puede infiltrarse en un determinado periodo. La recarga a los acuíferos es un proceso complejo y tiene varias componentes: la recarga directa o aquella que se infiltra directamente en un sitio según las propiedades de permeabilidad de las rocas y la recarga lateral o de frente de montaña. Esta última recarga se refiere a volúmenes que se infiltraron en otras zonas altas y recorren vías de flujo subterráneo hacia zonas bajas, también es conocida como recarga regional. El adecuado conocimiento del volumen de recarga requiere de una instrumentación mínima tal como: estaciones meteorológicas e hidrométricas y valorar las características de porosidad de suelos y rocas. Enfrentar los retos del cambio climático obliga a que se busquen vínculos de investigación y desarrollo con las dependencias gubernamentales que tienen la facultad de tomar decisiones y en la formación de profesionistas capacitados que atiendan problemáticas reales y específicas.

El objetivo de este trabajo fue lograr la integración de las formaciones de los estudiantes participantes (ingeniería ambiental, química y geografía) para plantear una estrategia de evaluación de la recarga en el municipio de Guanajuato durante el inicio del periodo de lluvias 2024. Se asignaron las diferentes tareas de compilar datos de estaciones meteorológicas en línea, cuantificar la lluvia en el área de la cuenca La Purísima, coleccionar y analizar muestras para aplicar los cálculos correspondientes.

### Zona de estudio

La cuenca del río Guanajuato-Purísima tiene una extensión de 494 km<sup>2</sup>, con un gradiente de elevación de 2,813 a 1,851 msn m. La geología de esta cuenca es muy compleja y ha sido ampliamente descrita. Para el caso de estudio de evaluación de la recarga utilizando el método de cloruros, simplificamos la descripción geológica separando los medios en fracturado y granular. En el medio fracturado entran todas las rocas del Jurásico al Terciario: lutitas y calizas sedimentarias, así como intrusivas del Cretácico y volcánicas riolíticas y andesíticas del Terciario. El medio granular son las rocas más recientes, gravas del Terciario tardío y del Cuaternario, en la Figura 1 en coloraciones amarillas. En la Figura 1 se muestra el polígono en azul de la cuenca Guanajuato-Purísima así como la ubicación de las estaciones meteorológicas analizadas (con ícono de nube) y los pozos y manantiales donde se colectaron muestras de agua (íconos de círculos blancos).

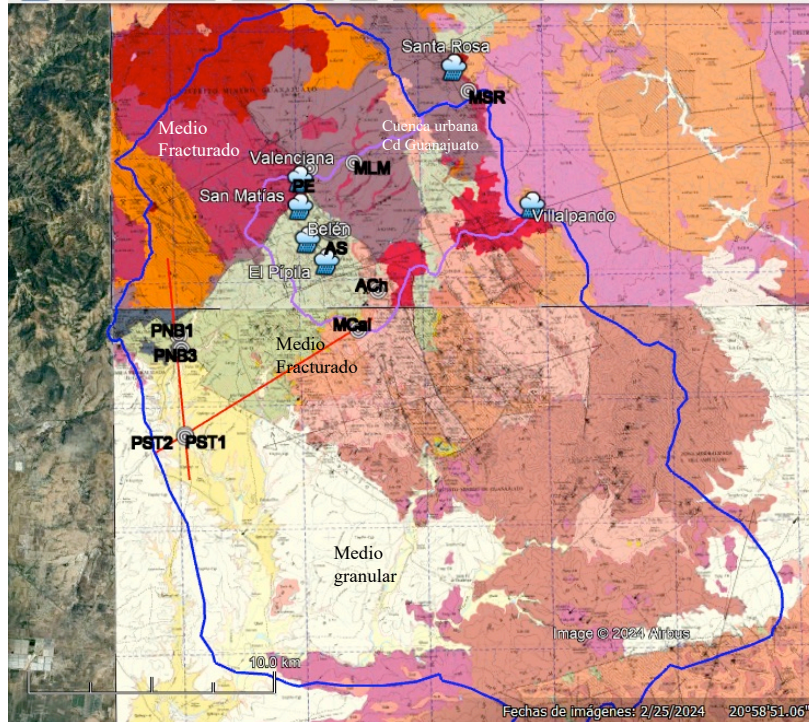


Figura 1. Ubicación de la cuenca del río Guanajuato-Purísima, ubicación de las estaciones meteorológicas analizadas y de los sitios de muestreo.

## Metodología

Para el muestreo realizado en pozos, se midió la profundidad con cintas graduadas y un flexómetro, para después extraer el agua con una cubeta con capacidad de 6 litros de agua, Para obtener los datos de medición tales como el pH, la temperatura y la conductividad, se tomó un dispositivo multiparamétrico, y con el agua extraída se limpió la sonda, esto para eliminar cualquier contaminante del contenedor de muestreo. Con la sonda calibrada previamente, se sumergió en el agua recolectada, y la pantalla arrojó los resultados.

En cuanto al protocolo en manantiales, se siguió el mismo proceso con algunas variaciones, tales como que la sonda del dispositivo multiparamétrico se metió directamente en el agua recolectada. Para el protocolo en ríos, se siguió el proceso ya mencionado en pozos, y se agregó el paso de medir el flujo de agua con un velocímetro, aparte de medir el ancho del río y su profundidad.

Por último, referente al protocolo de muestreo de escurrimientos, la cubeta de muestreo fue colocada cerca del brote de agua, esperando a que se llene de cantidad suficiente de muestra.

La ciudad de Guanajuato tiene estaciones meteorológicas distribuidas en distintos puntos de la ciudad, las cuales registran la lluvia. En la Tabla 1 es posible apreciar los milímetros de lluvia que caen anualmente, y su altitud sobre el nivel del mar. Estos números se utilizaron para estimar la recarga por el método de balance de cloruros.

**Tabla 1.** Ubicación de estaciones meteorológicas estudiadas, su altura y precipitación anual.

| Ubicación  | Altitud (m) | mm de lluvia anual |
|------------|-------------|--------------------|
| Santa Rosa | 2552.00     | 830.00             |
| Calderones | 2357.00     | 704.00             |
| Guanajuato | 1995.00     | 730.00             |
| Púrisima   | 1840.00     | 588.00             |

Para hacer una estimación de la recarga se hizo uso de la ecuación de balance hídrico  $R=P \times (C_p/C_s)$  la cual se deriva del concepto de balance de masas y ha sido ampliamente utilizada en hidrogeología para estimar la recarga de agua subterránea.

La ecuación de recarga se basa en el principio de conservación de masas. Este principio establece que la masa de cloruros que entra en un sistema debe igualar la masa que sale más cualquier cambio en la masa almacenada dentro del sistema.

Concentración en la precipitación ( $C_p$ ): La cantidad de cloruros que ingresa al sistema a través de la precipitación se puede expresar como:

$$M_p = P \times C_p$$

Donde:

$M_p$  es la masa de cloruros en la precipitación.

$P$  es la precipitación anual (en mm).

$C_p$  es la concentración de cloruros en la precipitación (en mg/L).

Concentración en el Agua Subterránea ( $C_s$ ): La cantidad de cloruros en el agua subterránea puede expresarse como:

$$M_s = R \times C_s$$

Donde:

$M_s$  es la masa de cloruros en el agua subterránea.

$R$  es la recarga anual de agua subterránea (en mm).

$C_s$  es la concentración de cloruros en el agua subterránea (en mg/L).

Esta ecuación fue desarrollada y popularizada en estudios hidrogeológicos por científicos y matemáticos que trabajaban en el campo de la hidrogeología y la hidrología.

## Resultados y Discusión

### Cuantificación del volumen de lluvia

La Tabla 2 muestra el volumen de lluvia que fue cuantificado con el método de isólinas. ES muy notable el volumen de lluvia en toda el área de la cuenca del río Guanajuato-Purísima. Estos valores fueron cuantificados de datos de estaciones ubicadas en las localidades Santa Rosa, Villalpando, Valenciana, San Marías, El Pípila y Belén. En el transcurso de trabajo decidimos eliminar los datos que arrojó la estación El Pípila debido a que casi todos los días resultaron el doble o más que los valores máximos.

**Tabla 2.** Cuantificación del volumen de lluvia para junio y julio de las normal climatológica 1960-2000 y de 2024..

| Periodo                | P [mm] | % respecto a normal |
|------------------------|--------|---------------------|
| Junio Normal 1960-2000 | 62.54  |                     |
| Julio Normal 1960-2000 | 87.62  |                     |
| Junio 2004 (19 al 30)  | 98.72  | 1.58                |
| Julio 2024 (1 al 22)   | 109.62 | 1.25                |

### Evaluación de los tipos de aguas

La Figura 2 contiene los datos de alcalinidad (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>), sulfatos (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>), y cloruros (Cl<sup>-</sup>) de las muestras de pozos tomadas en fechas específicas. Estas firmas aniónicas son esenciales para comprender la química del agua subterránea en la región.

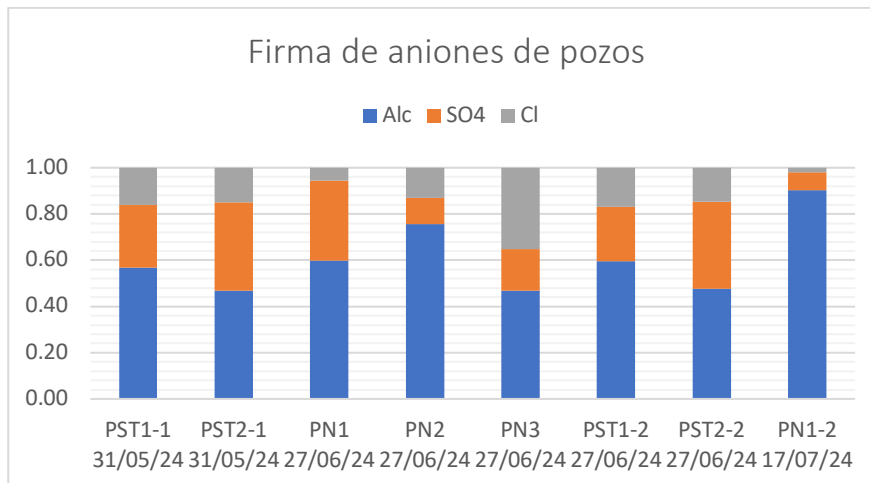


Figura 2. Firmas de aniones para muestras de aguas colectadas en pozos someros en el acuífero granular de Guanajuato: PST: Pozo Santa Teresa, PN: Pozos Nochebuena

**Alcalinidad (Alc):** En general las muestras de los pozos muestran una alta proporción de alcalinidad. Por ejemplo, el pozo PN1-2 (17/07/24) presenta la alcalinidad más alta que es del 90%, lo que indica una dominancia de bicarbonatos en el agua. La dominancia de la alcalinidad en la mayoría de las muestras sugiere que el sistema acuífero está en contacto con formaciones carbonatadas, esto puede estar relacionado con la disolución de minerales carbonatados presentes en el subsuelo.

**Sulfatos (SO<sub>4</sub>):** Las concentraciones de sulfatos varían considerablemente entre las muestras. Por ejemplo, en PST2-1 (31/05/24), los sulfatos representan el 38% del total de aniones, mientras que en PN1-2 (17/07/24) representan solo el 8%. Esto puede indicar diferencias en la composición mineralógica de los cuerpos de agua o la presencia de fuentes puntuales de contaminación por sulfatos.

**Cloruros (Cl):** Los cloruros tienen una presencia menos dominante, aunque en algunas muestras como PN3 (27/06/24), representan el 35% de los aniones. Esto sugiere una posible influencia de aguas salinas o la existencia de procesos de intercambio iónico en el cuerpo de agua.

La variabilidad en los sulfatos y cloruros puede estar asociada con la geología local o con la influencia de actividades antropogénicas, como la agricultura o la minería. Estas actividades pueden movilizar sulfatos y cloruros a los acuíferos. Este análisis proporciona una visión general de la calidad del agua en los pozos estudiados, destacando la importancia de la alcalinidad y las posibles influencias de actividades humanas o geológicas en los niveles de sulfatos y cloruros.

La Figura 3 presenta la firma de aniones de varios arroyos y manantiales. Estos aniones son cruciales para entender la composición química del agua y sus posibles fuentes o procesos geológicos.

**Alcalinidad (Alc):** Representada en azul, domina en muchas de las muestras, especialmente en aquellas de los arroyos y manantiales como MLM (Manantial Los Mexicanos), AM (Arroyo Los Mexicanos), y AN (Arroyo Nochebuena). Esto indica una prevalencia de bicarbonatos, que es común en aguas con interacción significativa con formaciones carbonatadas.

**Sulfatos (SO<sub>4</sub>):** Representados en naranja, los sulfatos muestran variaciones significativas entre las distintas muestras. Notablemente, hay concentraciones elevadas en muestras como DJV (Drenaje Jales Valenciana) y DCV (Drenaje Cuenca Valenciana). Estas concentraciones pueden reflejar la influencia de actividades mineras o de procesos de oxidación de minerales sulfurosos.

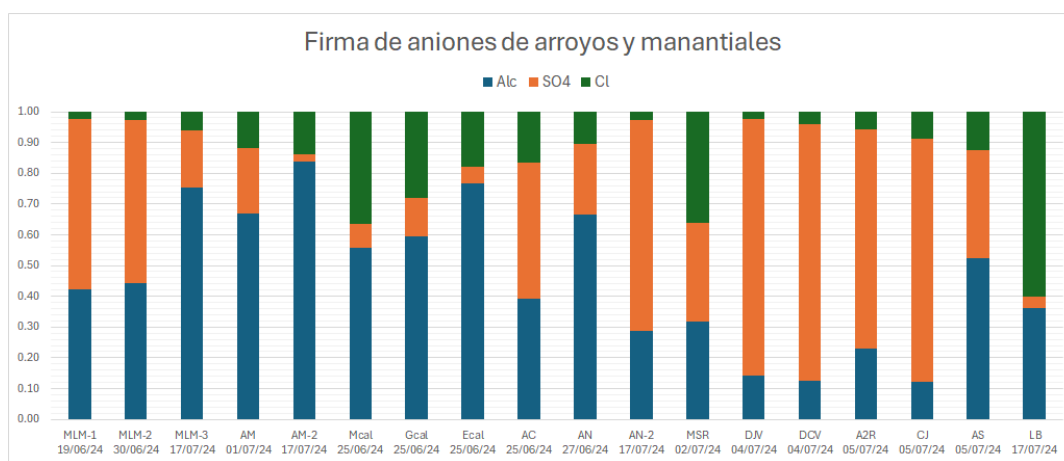


Figura 3. Firmas de aniones para muestras de aguas colectadas en manantiales y arroyos en el río Guanajuato.

**Cloruros (Cl):** Representados en verde, los cloruros están presentes en diversas concentraciones, siendo particularmente altos en muestras como LB (Lixiviados Basurero). Esto podría indicar la influencia de fuentes antropogénicas o de aguas subterráneas salinas que afluyen hacia estas áreas.

La comparación entre las distintas ubicaciones revela una variabilidad considerable en la composición aniónica, lo que puede deberse a diferencias en la geología subyacente, las fuentes de recarga y la influencia de actividades humanas. Estas firmas aniónicas son esenciales para entender la dinámica hidrológica y la calidad del agua en la región, proporcionando indicios sobre las posibles fuentes de contaminación o procesos naturales en el entorno.



## Evaluación de la recarga con el método de balance de cloruros

La Tabla 3 muestra los resultados sobre la recarga estimada en varios sitios, utilizando el método de balance de cloruros. La recarga se ha calculado comparando la concentración de cloruros en las precipitaciones y en las muestras de agua subterránea. A continuación, se detallan las columnas de la tabla y se proporciona una interpretación de los resultados:

Sitio: Localización donde se realizaron las mediciones de agua subterránea.

P (mm): Cantidad anual de precipitación en milímetros, registrada por sondas cercanas a los sitios de interés.

[Cl] (mg/L): Concentración de cloruros medida en las muestras de agua subterránea.

R (mm): Recarga de agua subterránea calculada en milímetros, utilizando la fórmula  $R=P \times (C_p/C_s)$ .

%R: Porcentaje de la recarga con respecto a la precipitación total.

**Tabla 3.** Estimación de la recarga para pozos y manantiales en el municipio de Guanajuato

| Sitio | P   | [Cl] mg/L | R (mm) | %R  |
|-------|-----|-----------|--------|-----|
| MLM   | 830 | 14        | 296.4  | 36% |
| Mcald | 704 | 12        | 293.3  | 42% |
| PN1   | 730 | 20        | 182.5  | 25% |
| PN2   | 730 | 61        | 59.8   | 8%  |
| PN3   | 730 | 112       | 32.6   | 4%  |
| PST1  | 588 | 88        | 33.4   | 6%  |
| PST2  | 588 | 91        | 32.3   | 5%  |

Mayor recarga: Los sitios MLM (Manantial Los Mexicanos) y Mcald (Manantial Calderones) muestran las mayores recargas absolutas y relativas, con valores de 296.4 mm y 293.3 mm, respectivamente, y porcentajes de recarga del 36% y 42% respecto a la lluvia total. Estos sitios tienen concentraciones de cloruros más bajas, lo que sugiere una mayor infiltración de agua de lluvia en comparación con otros sitios. Estos manantiales son brotes de agua desde rocas volcánicas fracturadas.

Menor recarga: Por otro lado, sitios como PN3 y PST1 presentan las menores recargas, con valores de 32.6 mm y 33.4 mm, y porcentajes de recarga de solo el 4% y 6%, respectivamente. Las altas concentraciones de cloruros en estos sitios indican una menor contribución de agua de lluvia a la recarga del acuífero, posiblemente debido a factores como la baja permeabilidad del suelo o una mayor evaporación.

Variabilidad en Cloruros: La variabilidad en la concentración de cloruros (desde 12 mg/L hasta 112 mg/L) refleja diferencias en la química del agua subterránea, que podrían deberse a diversas fuentes de contaminación, procesos geológicos locales o influencia de fuentes antropogénicas.

Esta información es crucial para la gestión del recurso hídrico en la región, ya que permite identificar áreas con mayor y menor potencial de recarga, y planificar intervenciones para mejorar la gestión del agua subterránea.

## Conclusiones

Este trabajo mostró que el año 2024 se está presentando muy lluvioso respecto a las normales climatológicas. El volumen de lluvia acumulado del 19 de julio al 22 de julio ha sido de 207 Mm<sup>3</sup>, los valores de las normales son de 150 Mm<sup>3</sup>, esto representa un 138 %. El volumen de recarga varía en función del medio geológico, para medios fracturados en partes altas resultó ser muy alto (25 al 42 %) y en los medios granulares muy bajo del 4 al 8 %. Estos resultados son un primer paso para continuar más adelante con el monitoreo y derivar una recarga anual. Es importante describir la variabilidad espacial de las condiciones de las rocas y suelos para plantear un modelo más acertado para conocer el volumen de recarga anual del municipio de Guanajuato.

La muestras de agua serán analizadas por cationes y metales traza para plantear sus condiciones de potabilidad.

## Bibliografía/Referencias

- Aparicio, F.J. (1989). Fundamentos de hidrología de superficie. Limusa, 142.
- CONAGUA. Normales climatológicas
- Crosbie, R. S., & Rachakonda, P. K. (2021). Constraining probabilistic chloride mass-balance recharge estimates using baseflow and remotely sensed evapotranspiration: the Cambrian Limestone Aquifer in northern Australia. *Hydrogeology Journal*, 29(4), 1399-1419.
- Gebru, T. A., & Tesfahunegn, G. B. (2019). Chloride mass balance for estimation of groundwater recharge in a semi-arid catchment of northern Ethiopia. *Hydrogeology Journal*, 27(1).
- Ifediegwu, I. S. (2020). Groundwater recharge estimation using chloride mass balance: a case study of Nsukka local government area of Enugu State, Southeastern, Nigeria. *Modeling Earth Systems and Environment*, 6(2), 799-810.
- INEGI. Marco geoestadístico 2024
- Pavlovskii, I., Hayashi, M., & Cey, E. E. (2019). Estimation of depression-focussed groundwater recharge using chloride mass balance: problems and solutions across scales. *Hydrogeology Journal*, 27(6), 2263-2278.
- Segobaetso, T. K., Tafesse, N. T., Mapeo, R. B. M., & Laletsang, K. (2022). Groundwater recharge using the chloride mass balance method in the Kanye area, in southeast Botswana. *Journal of African Earth Sciences*, 193, 104534.
- Cook, G. W. (1966). Recharge of aquifers using the chloride method. *Journal of Hydrology*, 4(1), 62-65.
- Domenico, P. A., & Schwartz, F. W. (1998). *Physical and chemical hydrogeology*. John Wiley & Sons.
- Uugulu, S., & Wanke, H. (2020). Estimation of groundwater recharge in savannah aquifers along a precipitation gradient using chloride mass balance method and environmental isotopes, Namibia. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts a/b/c*, 116, 102844.