

Impacto de la variabilidad pluviométrica en el balance hídrico de los acuíferos costeros en la costa sur de Artemisa y Mayabeque, Cuba

Lisángela Espinosa AmadorE-MAIL: lisangelaespinosaamador2002@gmail.com

Centro de Investigaciones Hidráulicas, Universidad Tecnológica de La Habana "José Antonio Echeverría" (CUJAE)

Roxana Aymeé Luis WinogradE-MAIL: roxluis87@gmail.com

Empresa Aguas de La Habana, La Habana, Cuba

José Manuel Guzmán MenéndezE-MAIL: jmguzmanmenendez@gmail.com

Agencia de Medio Ambiente (AMA), Ministerio de Ciencia tecnología y Medio Ambiente (CITMA), La Habana, Cuba

RESUMEN

La evaluación de la disponibilidad y dinámica del recurso hídrico subterráneo en regiones cársicas costeras requiere un análisis integrado de la variabilidad climática y la respuesta hidrogeológica del sistema acuífero. El presente estudio analiza el comportamiento de las precipitaciones y su impacto en el balance hídrico de los subacuíferos de la costa sur de las provincias Artemisa (período 2007–2024) y Mayabeque (2009–2024) en Cuba. Mediante la aplicación de pruebas de homogeneidad (t-Student, Cramer, Fischer) y análisis de consistencia (curvas de doble masa) a 46 estaciones pluviométricas, se validó y completó la base de datos histórica. Se determinaron índices de sequía meteorológica (PPN, SPI, IRS) aplicando la Teoría de Rachas, y se cuantificó el balance hídrico subterráneo contrastando la recarga por infiltración directa con los volúmenes de extracción. Los resultados revelan una dicotomía crítica: mientras los subacuíferos HS-1 Corojal y HS-3 Artemisa-Quivicán presentan balances anuales superavitarios, el subacuífero HS-4 Batabanó evidencia una condición de déficit hídrico crónico y sostenido, con balances negativos en toda la serie analizada. Se concluye que la sobreexplotación estructural del HS-4, exacerbada por la ocurrencia de sequías intensas como la registrada en 2019, compromete la sostenibilidad de las reservas y constituye un factor de riesgo preponderante para la intensificación de procesos de intrusión marina en el litoral sur.

PALABRAS CLAVE: hidrogeología, índice de sequía, infiltración, precipitación, sobreexplotación, subacuíferos, variabilidad climática

Impact of Precipitation Variability on the Water Balance of Coastal Aquifers on the Southern Coast of Artemisa and Mayabeque, Cuba



RECIBIDO

APROBADO

Este es un artículo publicado en acceso abierto bajo una licencia [Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

ABSTRACT

The assessment of groundwater availability and dynamics in coastal karst regions requires an integrated analysis of climate variability and the hydrogeological response of the aquifer system. This study analyzes precipitation behavior and its impact on the water balance of the sub-aquifers on the southern coast of Artemisa and Mayabeque provinces, Cuba, during the 2009-2024 period. By applying homogeneity tests (t-Student, Cramer, Fischer) and consistency analysis (double-mass curves) to 46 rain gauge stations, the historical database was validated and completed. Meteorological drought indices (PPN, SPI, IRS) were determined by applying Runs Theory, and the groundwater balance was quantified by contrasting direct infiltration recharge with extraction volumes. The results reveal a critical dichotomy: while the HS-1 Corojal and HS-3 Artemisa-Quivicán sub-aquifers present surplus annual balances, the HS-4 Batabanó sub-aquifer demonstrates a condition of chronic and sustained water deficit, with negative balances throughout the entire analyzed series. It is concluded that the structural overexploitation of HS-4, exacerbated by the occurrence of intense droughts such as that recorded in 2019, compromises the sustainability of reserves and constitutes a preponderant risk factor for the intensification of marine intrusion processes on the southern coastline.

KEYWORDS: *climate variability, drought index, hydrogeology, infiltration, overexploitation, precipitation, subaquifers*

01 INTRODUCCIÓN

Los acuíferos cársicos costeros constituyen sistemas hidrogeológicos de alta complejidad y vulnerabilidad estratégica, particularmente en contextos insulares y regiones con marcada estacionalidad pluviométrica. En estos entornos, la interacción dinámica entre el flujo de agua dulce subterránea, las variaciones en la recarga por precipitación y la interfase salina marina determina la disponibilidad y calidad del recurso hídrico para el abastecimiento humano y el desarrollo agrícola (Kresic & Mikszewski, 2013). En las provincias de Artemisa y Mayabeque, ubicadas en el occidente de Cuba, el acuífero regional de la Llanura Cársica Meridional representa la principal fuente de suministro; sin embargo, su sostenibilidad se encuentra amenazada por la confluencia de factores climáticos adversos y una gestión de la demanda que, en sectores específicos, supera la capacidad de renovación natural del sistema.

La evaluación rigurosa de la relación entre la oferta hídrica natural y la presión extractiva requiere superar las limitaciones inherentes a los registros pluviométricos históricos, los cuales a menudo presentan lagunas de información, heterogeneidades espaciales y rupturas en la consistencia temporal de las series. La falta de una base de datos hidroclimática validada constituye una fuente significativa de incertidumbre en la modelación hidrológica y en la cuantificación de los balances hídricos subterráneos (Peterson et al., 1998). En este contexto, la implementación de pruebas estadísticas paramétricas y no paramétricas para el control de calidad, la homogeneización y el completamiento de datos pluviométricos emerge como un paso metodológico indispensable previo a cualquier análisis cuantitativo.

El presente trabajo, enmarcado en el proyecto «Mi Costa» (Tarea Vida), se enfoca en el análisis de las precipitaciones y su traducción hidrogeológica en términos de recarga efectiva y balance volumétrico para tres subacuiferos diferenciados en la costa sur de Artemisa y Mayabeque. Se plantea como objetivo central determinar la influencia de la variabilidad climática interanual sobre el estado del balance hídrico subterráneo en el período 2009-2024. A través de este análisis, se busca diagnosticar la condición de explotación sostenible o sobreexplotación de las unidades hidrogeológicas estudiadas, proporcionando una línea base cuantitativa para la gestión integrada de los recursos hídricos y la evaluación del riesgo de degradación por intrusión marina en el acuífero costero.

02 REFERENTES TEÓRICOS

El estudio del régimen pluviométrico y su impacto en las aguas subterráneas se fundamenta en los principios de la hidrología estadística y la hidrogeología cuantitativa. La base metodológica para el procesamiento de datos históricos de precipitación se apoya en las directrices clásicas de la hidrología aplicada, las cuales establecen que el análisis de variabilidad climática y la modelación hidrológica dependen críticamente de la calidad y homogeneidad de las series temporales de entrada (Chow et al., 1988). Una serie de datos se considera homogénea cuando sus fluctuaciones reflejan exclusivamente la variabilidad climática natural, libre de distorsiones inducidas por cambios en la instrumentación, reubicación de estaciones o modificaciones en el entorno de medición (Frost, 2020).

Para la detección de rupturas o inhomogeneidades en los registros históricos, la literatura especializada propone la aplicación de un conjunto de pruebas estadísticas paramétricas y no paramétricas. La prueba t de Student permite contrastar la hipótesis nula de igualdad de medias entre dos subperíodos de una serie, constituyendo una herramienta eficaz para identificar saltos abruptos en la tendencia central de los datos (Peterson et al., 1998). Complementariamente, la prueba F de Fisher se emplea para evaluar la homocedasticidad de la varianza, un supuesto crítico en numerosos análisis climáticos cuya violación puede indicar cambios en la dispersión de las observaciones asociados a alteraciones instrumentales o de exposición (Wilks, 2011). Por su parte, la prueba de Cramer ofrece una evaluación más comprehensiva al contrastar si dos subperíodos provienen de una misma distribución de probabilidad, siendo particularmente sensible a modificaciones en la forma de la distribución que afectan la frecuencia de eventos extremos o la asimetría de la serie (Lanzante, 1996).

El análisis de curvas de doble masa es un método gráfico-analítico, desarrollado originalmente por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), se fundamenta en el principio de proporcionalidad acumulada entre una estación bajo escrutinio y una estación de referencia confiable. La desviación sistemática de la linealidad en la curva de doble masa constituye un indicador robusto de inhomogeneidad en la serie evaluada (Searcy & Hardison, 1960). Para la estimación de datos faltantes en registros incompletos, se han desarrollado diversas técnicas de interpolación espacial y correlación, entre las que destacan los métodos basados en ponderación por el inverso de la distancia, relaciones normalizadas y modelos de regresión lineal, siendo este último particularmente eficaz cuando existe una alta correlación espacial de la variabilidad climática interanual (Haan, 2002; Wilks, 2011).

La sequía meteorológica, definida como un déficit prolongado de precipitación respecto a las condiciones climáticas normales, se cuantifica mediante índices estandarizados que permiten comparar la severidad, duración y frecuencia de los eventos secos en distintos contextos espaciales y temporales. El Índice Estandarizado de Precipitación (SPI), desarrollado por McKee et al. (1993), es ampliamente reconocido por la Organización Meteorológica Mundial como un indicador probabilístico robusto que expresa la anomalía de precipitación en unidades de desviación estándar, facilitando la evaluación del déficit hídrico en múltiples escalas de tiempo (World Meteorological Organization, 2012). De forma complementaria, el Porcentaje de Precipitación Normal (PPN) ofrece una medida simple de desviación relativa respecto a la media histórica (Hayes, 2006). La Teoría de Rachas proporciona el marco analítico para extraer, a partir de series temporales, los atributos fundamentales de los episodios secos: duración, severidad e intensidad (Burka et al., 2023).

La evaluación de la sostenibilidad de la explotación de aguas subterráneas se basa en el principio de conservación de la masa aplicado al sistema acuífero. El balance hídrico expresa la relación entre la recarga, las extracciones y la variación del almacenamiento, constituyendo la herramienta diagnóstica fundamental para identificar situaciones de sobreexplotación y evaluar la renovabilidad del recurso (Kresic & Mikszewski, 2013). En acuíferos cársicos libres, la recarga por infiltración directa de la precipitación representa el componente principal de entrada al sistema. Su cuantificación se realiza comúnmente mediante coeficientes de infiltración empíricos, los cuales relacionan la lámina de lluvia con las propiedades texturales e hidrodinámicas del suelo. Los parámetros propuestos por Rawls et al. (1983), derivados del modelo de Green-Ampt, proporcionan una base experimental para la estimación de la recarga potencial en función de la clase de suelo y la conductividad hidráulica saturada.

03 MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Área de estudio

El área de estudio se localiza en la costa sur de las provincias de Artemisa y Mayabeque, Cuba, dentro del Tramo 1 del proyecto «Mi Costa» (Tarea Vida). Comprende los municipios de Alquizar, Güira de Melena (Artemisa), Güines, Melena del Sur y Batabanó (Mayabeque), desde playa Majana hasta playa Rosario. Geográficamente queda delimitada por las coordenadas Xmin: 311 776, Ymin: 314 523 y Xmax: 326 255, Ymax: 401 475 (sistema Cuba Norte NAD 27) (Figura 3.1). Esta franja costera se caracteriza por un perfil bajo, pantanoso y la presencia de extensos manglares que forman parte de la Llanura Cársica Meridional (Espinosa Amador, 2026).



Figura 3.1. Ubicación del área de estudio (Espinosa Amador, 2026).

3.2. Hidrogeología

Las investigaciones hidrológicas previas en los territorios de Artemisa y Mayabeque han consolidado un marco de conocimiento especializado sobre la dinámica de los sistemas acuíferos, los procesos de intercambio en la interfase continental-marina y los factores de vulnerabilidad que condicionan la sostenibilidad de las reservas hídricas subterráneas. El dominio hidrogeológico regional se caracteriza por un desarrollo cárstico predominante, donde la infiltración y la circulación del flujo subterráneo están gobernadas estructuralmente por la porosidad secundaria y la permeabilidad de la matriz carbonatada (Espinosa Amador, 2026).

En el sector de estudio, el acuífero regional se encuentra compartimentado en cinco subacuíferos diferenciados con base en criterios litoestratigráficos y geomorfológicos (Figura 3.2).

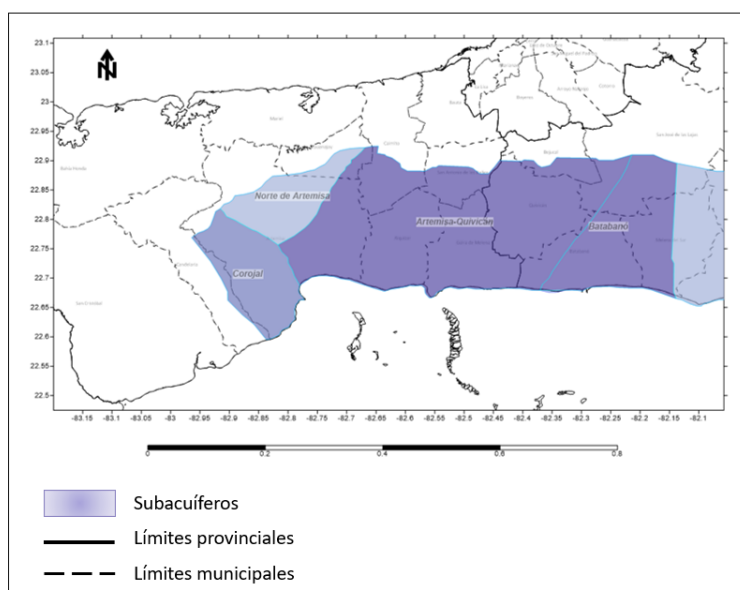


Figura 3.2. Mapa de subacuíferos del área de estudio.

3.3. Análisis y procesamiento de la base de datos

Los registros pluviométricos fueron obtenidos del Sistema de Gestión Integral del Agua (SGIA) del Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INRH). Se seleccionaron 23 estaciones en la provincia de Artemisa y 23 en Mayabeque. Para cada estación se determinó la lluvia anual, y se aplicó un protocolo de control de calidad basado en la inspección visual de gráficos cronológicos y de simple masa, con el fin de identificar posibles errores accidentales.

La homogeneidad de las series se evaluó mediante tres pruebas estadísticas paramétricas: *t de Student* para detectar rupturas en la media; *F de Fisher* para verificar la homocedasticidad de la varianza y *Cramer* para contrastar cambios en la distribución de probabilidad. La consistencia relativa de los registros validados se verificó mediante curvas de doble masa, tomando como referencia estaciones confiables identificadas en los análisis previos. Los datos faltantes en las series validadas se completaron empleando modelos de regresión lineal, previa verificación de un coeficiente de correlación de Pearson significativo ($r > 0,7$) entre la estación incompleta y estaciones de referencia cercanas (Wilks, 2011). La precipitación media para cada provincia se calculó mediante el método de la media aritmética.

3.4. Determinación de índices de sequía

La caracterización de los eventos de déficit hídrico se realizó mediante la aplicación de la Teoría de Rachas, estableciendo como umbral la precipitación media hiperanual del período analizado (Burka et al., 2023). A partir de las series de precipitación anual, se calcularon tres indicadores complementarios.

El PPN, que calcula la desviación de la precipitación observada respecto a un valor climatológico de referencia, cuya expresión es:

$$PPN = \frac{P_{anual(año\ i)} - P_{media\ hiperanual}}{P_{anual(año\ i)}} \times 100 \quad (3.1)$$

Donde $P_{anual(año\ i)}$ es la precipitación media anual en un determinado año y $P_{media\ hiperanual}$ es el promedio de las precipitaciones anuales de la serie analizada.

El SPI, que permite cuantificar el déficit o superávit de precipitación en múltiples escalas de tiempo, permitiendo evaluar impactos en sistemas con diferentes tiempos de respuesta, a través de la siguiente fórmula:

$$DEP = \frac{P_{anual(año\ i)} - P_{media\ hiperanual}}{S_{serie\ anual}} \quad (3.2)$$

Donde $S_{serie\ anual}$ es la desviación de la serie de precipitaciones anuales.

El Índice de Repetibilidad de Sequía, que no es un índice formal y estándar, sino más bien un concepto analítico que describe el estudio de la frecuencia y recurrencia de eventos de sequía en una región a lo largo del tiempo. Se aborda principalmente mediante análisis de series temporales y estadística aplicada a índices estándar (Handbook of Drought Indicators and Indices, 2016), calculado por la expresión:

$$Z_{ji} = \frac{X_{ij} - \bar{X}_j}{S_j} \quad (3.3)$$

Donde X_{ij} representa el total anual de la lluvia en la estación j en el año i ; $\bar{X}_j$ y S_j son la media y la desviación estándar del período seleccionado.

3.5. Cálculo del balance hídrico

El balance hídrico subterráneo se fundamenta en el principio de conservación de la masa aplicado al sistema acuífero. La ecuación general para un intervalo de tiempo se expresa como:

$$B = R - E \quad (3.4)$$

Donde B representa el balance neto, R es el volumen de recarga anual por infiltración directa de la precipitación, y E corresponde al volumen total extraído por bombeo en el año (Kresic & Mikszewski, 2013). La recarga anual

se estimó mediante la expresión:

$$R = P \cdot C_i \cdot A \quad (3.5)$$

Siendo P la precipitación media anual, C_i el coeficiente de infiltración dependiente de las propiedades texturales e hidrodinámicas del suelo y A el área del subacuífero. Los volúmenes de extracción se obtuvieron del registro de bombeo potencial disponible en la plataforma SGIA del INRH.

Los coeficientes de infiltración (C_i) se determinaron en función de la textura del suelo predominante en cada subacuífero, según la clasificación de Rawls et al. (1983). Para el subacuífero HS-1 Corojal, dominado por suelos arenosos, se adoptó $C_i = 0,35$. Para HS-3 Artemisa-Quivicán (suelos francos-arenosos) se usó $C_i = 0,30$. Para HS-4 Batabanó (suelos arcillosos con limitada permeabilidad) se empleó $C_i = 0,18$. Estos valores fueron validados con estudios locales de infiltración (INRH, 2019).

04 RESULTADOS

4.1. Homogeneidad y completamiento de las series pluviométricas

El análisis de calidad y homogeneidad de las series de precipitación constituye un paso fundamental previo a cualquier estudio climático o hidrológico. Los resultados para Artemisa y Mayabeque revelan características distintivas en la calidad de sus registros pluviométricos.

Los gráficos cronológicos y de simple masa permitieron identificar visualmente posibles errores y periodos con inflexiones. Las pruebas estadísticas de *t-Student*, *Fischer* y *Cramer* mostraron perfiles diferenciados entre provincias y los gráficos de correlación y doble masa validaron la coherencia espacial y temporal de las series depuradas, permitiendo proceder al completamiento de datos faltantes mediante regresión lineal; la Tabla 4.1 muestra un resumen de estos análisis realizados.

Tabla 4.1. Resultados de las pruebas de homogeneidad y del completamiento de los datos faltantes

Provincia	Homogeneidad		Completamiento de las series	
	Estaciones analizadas	Estaciones homogéneas	Estaciones con datos faltantes	Datos completados
Artemisa	23	17	22	124
Mayabeque	23	18	19	37

En el caso de la provincia de Artemisa la red presenta una fragmentación severa: solo tres estaciones (Plu2200205, Plu2200350, Plu2200268) tienen series de 16 o más años en un período de 18 años. La mayoría presenta entre 9 y 13 años de registro, con hasta nueve años faltantes.

La situación en Mayabeque es más favorable, la red se encuentra notablemente más completa: 15 estaciones tienen 15 o 16 años de datos en un período de 16 años (2009-2024), y cuatro estaciones (Plu2400159, Plu2400302, Plu2400446, Plu2400447) presentan series completas sin años faltantes.

4.2. Índices de sequía

La precipitación media anual estableció un primer contraste: Artemisa registró 1 222,80 mm, mientras que Mayabeque presentó 1 437,29 mm. La aplicación de la Teoría de Rachas a la serie Aportación–Umbral evidenció fluctuaciones interanuales marcadas (Figuras 4.1 y 4.2).

Haciendo un análisis de la Figura 4.1 en Artemisa, los años 2019, 2021 y 2023 destacan como los más críticos, con valores negativos extremos (ej. -554,4 en 2019), años que coinciden con los más críticos en Mayabeque como se muestra en la Figura 4.2. La Tabla 4.2 resume los índices calculados, mostrando una recurrencia de condiciones secas en el último trienio. El Índice Estandarizado de Precipitación (SPI) tendió a suavizar la clasificación, manteniendo la mayoría de los años en el rango «normal o aproximadamente normal».

Según los resultados de la Tabla 4.3 en Mayabeque las desviaciones negativas fueron menos pronunciadas. Ningún

año alcanzó clasificación superior a «Ligera» o «Moderada» en el PPN (valores entre $-24,11\%$ y $-18,6\%$ en los años más secos: 2023, 2021, 2019). El IRS catalogó todos los eventos como «Moderada» o «Débil» y registró varios años con condiciones «Moderadamente húmedas» o «Muy húmedas» (SPI en 2017, 2022, 2024), lo que sugiere una mayor frecuencia de periodos de recuperación.

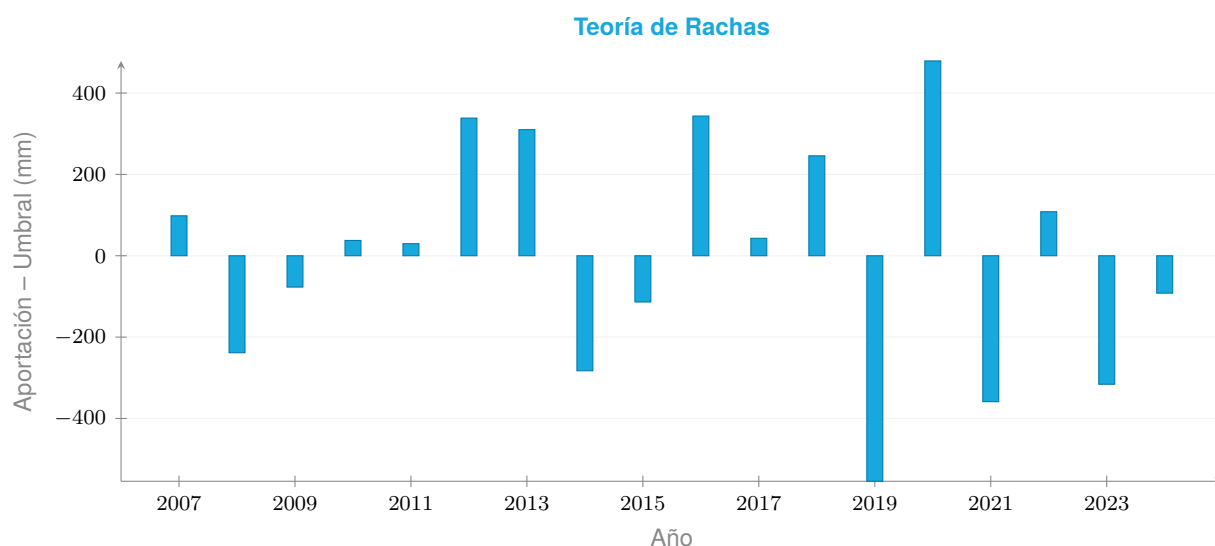


Figura 4.1. Teoría de Rachas para la serie de lluvias anuales de Artemisa a partir del año 2007 hasta el 2024.

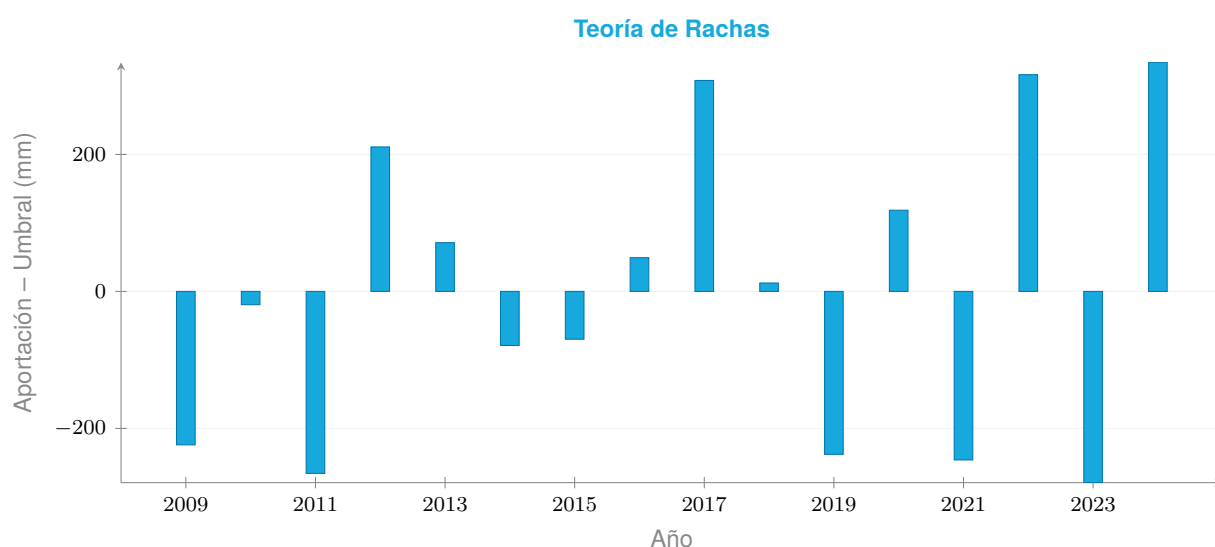


Figura 4.2. Teoría de Rachas para la serie de lluvias anuales de Mayabeque a partir del año 2009 hasta el 2024.

Tabla 4.2. Resultado del cálculo de los índices para Artemisa

Año	PPN	Clasif. PPN	SPI	Clasif. SPI	IRS	Clasif. IRS
2007	7,44	—	0,35	Normal o aprox. normal	0,35	Débil
2008	-24,23	Ligera	-0,85	Normal o aprox. normal	-0,85	Moderada
2009	-6,72	—	-0,27	Normal o aprox. normal	-0,27	Débil
2010	2,99	—	0,13	Normal o aprox. normal	0,13	Débil
2011	2,37	—	0,11	Normal o aprox. normal	0,11	Débil
2012	21,68	—	1,20	Moderadamente húmedo	1,20	Débil
2013	20,22	—	1,10	Moderadamente húmedo	1,10	Débil
2014	-30,09	Ligera	-1,01	Moderadamente seco	-1,01	Moderada
2015	-10,25	—	-0,40	Normal o aprox. normal	-0,40	Débil
2016	21,93	—	1,22	Moderadamente húmedo	1,22	Débil
2017	3,39	—	0,15	Normal o aprox. normal	0,15	Débil
2018	16,73	—	0,87	Normal o aprox. normal	0,87	Débil
2019	-82,95	Intensa	-1,97	Severamente seco	-1,97	Severa
2020	28,15	—	1,70	Muy húmedo	1,70	Débil
2021	-41,52	Moderada	-1,28	Moderadamente seco	-1,28	Moderada
2022	8,13	—	0,38	Normal o aprox. normal	0,38	Débil
2023	-34,84	Moderada	-1,12	Moderadamente seco	-1,12	Moderada
2024	-8,13	—	-0,33	Normal o aprox. normal	-0,33	Débil

Tabla 4.3. Resultado del cálculo de los índices para Mayabeque

Año	PPN	Clasif. PPN	SPI	Clasif. SPI	IRS	Clasif. IRS
2009	-18,46	—	-1,04	Moderadamente seco	-1,04	Moderada
2010	-1,37	—	-0,09	Normal o aprox. normal	-0,09	Débil
2011	-22,67	Ligera	-1,23	Moderadamente seco	-1,23	Moderada
2012	12,80	—	0,98	Normal o aprox. normal	0,98	Débil
2013	4,72	—	0,33	Normal o aprox. normal	0,33	Débil
2014	-5,81	—	-0,37	Normal o aprox. normal	-0,37	Débil
2015	-5,10	—	-0,32	Normal o aprox. normal	-0,32	Débil
2016	3,31	—	0,23	Normal o aprox. normal	0,23	Débil
2017	17,64	—	1,43	Moderadamente húmedo	1,43	Débil
2018	0,85	—	0,06	Normal o aprox. normal	0,06	Débil
2019	-19,83	—	-1,10	Moderadamente seco	-1,10	Moderada
2020	7,61	—	0,55	Normal o aprox. normal	0,55	Débil
2021	-20,65	Ligera	-1,14	Moderadamente seco	-1,14	Moderada
2022	18,04	—	1,46	Moderadamente húmedo	1,46	Débil
2023	-24,11	Ligera	-1,29	Moderadamente seco	-1,29	Moderada
2024	18,88	—	1,55	Muy húmedo	1,55	Débil

4.3. Balance hídrico

El análisis del balance hídrico para el período 2009-2024 reveló situaciones hidrogeológicas contrastantes entre los tres subacuíferos estudiados, la Tabla 4.4 muestra un resumen de los resultados obtenidos.

Tabla 4.4. Resumen del balance hídrico anual para los subacuíferos (2009-2024)

Subacuífero	Rango de recarga (hm ³)	Extracción (hm ³)	Balance	Estado
HS-1 Corojal	95,11 – 220,04	16,16	Siempre positivo	Sostenible
HS-3 Artemisa-Quivicán	1 158,08 – 1 992,91	682,05	Siempre positivo	Sostenible
HS-4 Batabanó	117,69 – 237,17	272,12	Siempre negativo	Sobreexplotación

Nota: Los volúmenes de extracción corresponden a valores medios anuales calculados a partir de los registros de bombeo potencial disponibles en la plataforma SGIA del INRH. No se disponía de la variación interanual de las extracciones, por lo que se asume una demanda constante durante el período.

Según los resultados de la Tabla 4.4 el subacuífero HS-4 Batabanó presenta una situación crítica de sobreexplotación. En cada uno de los 16 años analizados, el balance resultó negativo, con déficits anuales que variaron entre $-34,95 \text{ hm}^3$ (2022) y $-154,43 \text{ hm}^3$ (2009). La recarga fue siempre inferior a la extracción constante de $272,12 \text{ hm}^3$, evidenciando un agotamiento progresivo del almacenamiento y una alta vulnerabilidad a la intrusión marina.

Los resultados del balance para el HS-4 Batabanó fueron consistentes con los gráficos de balance elaborados por la Empresa de Aprovechamiento Hidráulico de Mayabeque, confirmando la tendencia de déficit permanente (Figura 4.3).

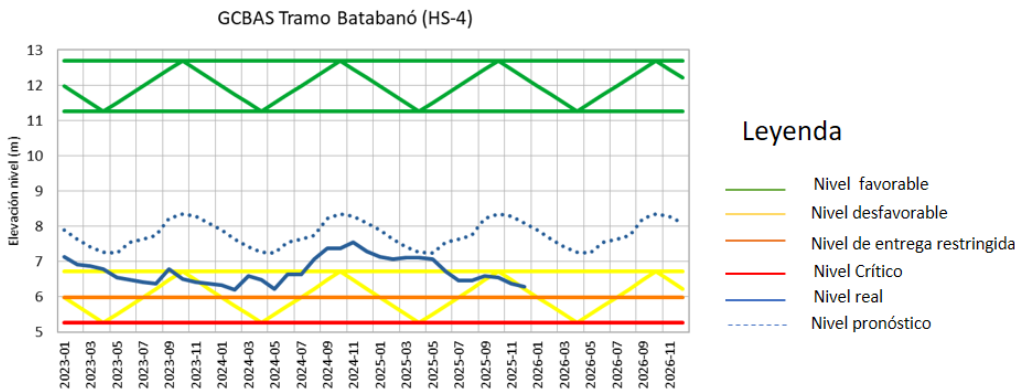


Figura 4.3. Gráfico del balance hídrico para el HS-4 Batabanó (Espinosa Amador, 2026).

05 DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos evidencian una condición de sobreexplotación crónica en el subacuífero HS-4 Batabanó, con balances negativos durante todo el período 2009-2024. Este hallazgo es consistente con los informes internos de la Empresa de Aprovechamiento Hidráulico de Mayabeque (Figura 4.3); la condición de déficit hídrico crónico identificada en el subacuífero HS-4 Batabanó no solo compromete la disponibilidad del recurso, sino que también incrementa su vulnerabilidad a procesos de contaminación.

La reducción de los niveles freáticos, asociada a la sobreexplotación, puede favorecer el avance de frentes de contaminación de origen antrópico hacia las zonas de captación. En este sentido, Luis Winograd y Valladares Hernández (2023) demostraron, para fuentes de abasto en San José de las Lajas, la importancia crítica de delimitar adecuadamente las Zonas de Protección Sanitaria (ZPS) para mitigar el impacto de agentes contaminantes.

Los autores Luis Winograd y Valladares Hernández (2023) subrayan que, sin una gestión integrada que aborde tanto el déficit cuantitativo como la calidad del agua, el riesgo de afectación de los pozos de abastecimiento se multiplica, lo que resulta en un problema de alta relevancia para la sostenibilidad hídrica de la región sur de Artemisa y Mayabeque. La persistencia del déficit en HS-4, incluso en años húmedos (ej. 2022 con recarga de

237,17 hm³ y déficit de -34,95 hm³), indica que la extracción anual (272,12 hm³) supera estructuralmente la capacidad de recarga media del subacuífero, estimada en aproximadamente 175 hm³/año.

Una limitación importante del estudio es el uso de un valor constante de extracción para todo el período. En la práctica, los bombeos varían anualmente por cambios en la demanda agrícola, poblacional y en la operación de los sistemas de abastecimiento. La ausencia de datos de extracción anuales impide evaluar si los déficits se agravan en años secos por un incremento del bombeo (respuesta adaptativa) o si permanecen invariables. Se recomienda en futuros trabajos incorporar series anuales de extracción para modelar con mayor precisión el estrés hídrico.

Otro aspecto a discutir es la simplificación del balance a solo dos términos (recarga por infiltración directa menos extracción). En sistemas cársicos costeros, existen flujos adicionales: descarga natural al mar, flujo subterráneo entre subacuíferos y evapotranspiración desde niveles freáticos someros. La omisión de estos componentes puede sobreestimar el déficit si, por ejemplo, parte del agua extraída es compensada por flujo lateral desde subacuíferos vecinos. No obstante, la magnitud del déficit anual (-35 a -154 hm³) es tan alta que difícilmente sería revertida por estos flujos, por lo que la conclusión de sobreexplotación se mantiene robusta.

En comparación con otras regiones cársicas costeras del Caribe (ej. acuífero de Yucatán, México), los coeficientes de infiltración utilizados (C_i) deben ser validados con ensayos de campo, ya que la porosidad secundaria de la matriz carbonatada puede generar recargas mucho más rápidas que las estimadas por modelos de suelo (Rawls et al., 1983). Se sugiere implementar pruebas con trazadores y mediciones de niveles piezométricos para calibrar la recarga efectiva.

Finalmente, el déficit crónico del subacuífero HS-4 Batabanó implica un riesgo elevado de intrusión marina, especialmente durante eventos de sequía como el del año 2019 (SPI = -1,97 en Artemisa). La interfase salina puede avanzar tierra adentro, afectando pozos de abastecimiento. Estudios previos en el litoral sur (Espinosa Amador, 2026) ya documentan signos de salinización en manglares, lo que refuerza la necesidad de medidas de gestión urgentes: reducción de extracciones, recarga artificial o cambio de fuentes de suministro.

06 CONCLUSIONES

El análisis de calidad y homogeneidad de las series de precipitación revela un perfil contrastante entre las dos provincias. Mayabeque cuenta con una red pluviométrica más completa y homogénea, mientras que Artemisa presenta una fragmentación de datos que limita los análisis espaciales detallados, aunque dispone de estaciones claves de alta confiabilidad.

La caracterización de la sequía mediante los índices PPN, SPI e IRS evidencia que Artemisa experimenta episodios de déficit hídrico más intensos que Mayabeque, con el año 2019 clasificado como de sequía severa. Esta mayor variabilidad y severidad, unida a su menor precipitación media, señala a Artemisa como una provincia con alta vulnerabilidad al estrés hídrico.

El balance hídrico de los subacuíferos costeros muestra una situación crítica y crónica de sobreexplotación en el subacuífero HS-4 Batabanó, con balances negativos persistentes durante todo el período 2009-2024. En contraste, los subacuíferos HS-1 Corojal y HS-3 Artemisa-Quivicán mantuvieron balances positivos, operando dentro de márgenes volumétricos sostenibles.

La metodología implementada constituye una herramienta fundamental para la gestión adaptativa de recursos hídricos en regiones cársicas costeras. Como medidas concretas para fortalecer futuros estudios, se recomienda: (1) fortalecer el mantenimiento de la red pluviométrica en Artemisa; (2) implementar un monitoreo piezométrico sistemático en el subacuífero HS-4 Batabanó; y (3) desarrollar modelos hidrogeológicos numéricos que simulen escenarios de gestión y evalúen el riesgo de intrusión marina bajo distintas condiciones climáticas y de extracción.

07 RECOMENDACIONES

Se recomienda fortalecer el mantenimiento y la continuidad de la red pluviométrica, especialmente en Artemisa, para reducir la fragmentación de datos y mejorar la capacidad de análisis espacial. Asimismo, se sugiere imple-

mentar un monitoreo piezométrico sistemático en el subacuífero HS-4 Batabanó para evaluar la evolución del almacenamiento y calibrar los balances hídricos con mediciones directas. Finalmente, se recomienda incorporar en futuros estudios la modelación hidrogeológica numérica para simular escenarios de gestión y evaluar el riesgo de intrusión marina bajo diferentes condiciones climáticas y de extracción.

08 REFERENCIAS

- Burka, A., Kebede, A., & Tilahun, S. (2023). Application of runs theory for drought characterization using SPI and SPEI indices. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 45, 101295.
- Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1988). *Applied hydrology*. McGraw-Hill.
- Espinosa Amador, L. (2026). *Determinación de la relación entre intrusión marina y la respuesta adaptación del manglar* [Tesis de diploma]. Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría” (Cujae).
- Hayes, M. J. (2006). *Drought indices* (inf. téc.). National Drought Mitigation Center, University of Nebraska-Lincoln.
- Kresic, N., & Mikszewski, A. (2013). *Hydrogeological conceptual site models: Data analysis and visualization*. CRC Press.
- Lanzante, J. R. (1996). Resistant, robust and non-parametric techniques for the analysis of climate data: Theory and examples. *International Journal of Climatology*, 16(11), 1197-1226.
- Luis Winograd, R. A., & Valladares Hernández, D. (2023). Determination of the sanitary protection zone, comparison of the NC1192:2017 and WhAEM methods, case study of supply sources in San Jose de la Lajas. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 44(3), 58-68.
- McKee, T. B., Doesken, N. J., & Kleist, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. *Preprints, 8th Conference on Applied Climatology*, 179-184.
- Peterson, T. C., Easterling, D. R., Karl, T. R., Groisman, P., Nicholls, N., Plummer, N., & Parker, D. (1998). Homogeneity adjustments of in situ atmospheric climate data: A review. *International Journal of Climatology*, 18(13), 1493-1517.
- Rawls, W. J., Brakensiek, D. L., & Miller, N. (1983). Green-Ampt infiltration parameters from soils data. *Journal of Hydraulic Engineering*, 109(1), 62-70.
- Searcy, J. K., & Hardison, C. H. (1960). *Double-mass curves* (Water-Supply Paper N.º 1541-B). U.S. Geological Survey.
- Wilks, D. S. (2011). *Statistical methods in the atmospheric sciences* (3.ª ed.). Academic Press.
- World Meteorological Organization. (2012). *Standardized Precipitation Index user guide* (inf. téc. N.º WMO-No. 1090). WMO.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

Contribución de los autores

Lisángela Espinosa Amador <https://orcid.org/0009-0003-9885-6850>

Trabajó en el procesamiento de los datos, haciendo contribuciones en el análisis e interpretación. Participó en la búsqueda de información y elaboración de las tablas, análisis de los resultados y en la revisión y redacción del artículo.

Roxana Aymeé Luis Winograd <https://orcid.org/0000-0002-4758-4045>

Realizó contribuciones en la interpretación de los datos. Participó en el diseño de la investigación, análisis de los resultados y en la revisión y redacción del artículo.

José Manuel Guzmán Menéndez <https://orcid.org/0000-0002-4989-870X>

Realizó contribuciones en el análisis de experto, así como la interpretación de los mismos. Participó en los análisis de los resultados.