

Índice sintético para evaluar la sequía hidráulica

Synthetic index to evaluate the hydraulic drought

Esvillel Ferrer-Pozo^{1*} <https://orcid.org/0000-0003-1011-7424>

Liliana Gómez-Luna² <https://orcid.org/0000-0002-1282-3392>

Yudith González-Díaz³ <https://orcid.org/0000-0003-1240-1146>

¹Delegación Provincial de Recursos Hidráulicos Guantánamo, Guantánamo, Cuba

²Centro Nacional de Electromagnetismo Aplicado, Universidad de Oriente, Santiago de Cuba, Cuba

³Facultad de Ingeniería Química y Agronomía, Universidad de Oriente, Santiago de Cuba, Cuba

*Autor para la correspondencia. Correo electrónico: esvillel@gmail.com

RESUMEN

Para la evaluación sistemática del comportamiento de la sequía hidráulica se necesitan datos precisos y formales de observaciones habituales tanto de variables del ciclo hidrológico como de aquellas asociadas a la infraestructura hidráulica. El manejo de este tipo de sequía requiere técnicas innovadoras para evaluar los recursos hídricos en condiciones extremas. Esta investigación se enfoca en el diseño de una herramienta metodológica para la evaluación de la sequía hidráulica. Inicialmente se realizó una búsqueda de herramientas para el manejo de la sequía, identificándose 18 indicadores ambientales y 46 índices entre los más empleados para su monitoreo y control, a partir de los que se seleccionan siete. Se identificaron vacíos metodológicos para la evaluación de la sequía hidráulica mediante

indicadores específicos. Se propone un índice para evaluar el estado de los recursos hídricos durante eventos de sequía, validado en el municipio Manuel Tames de la provincia de Guantánamo, con el propósito de incidir en el perfeccionamiento del manejo de este valioso recurso, apoyando en proceso de toma de decisiones.

Palabras clave: Guantánamo; índice de sequía hidráulica; Manuel Tames; sequía hidráulica.

ABSTRACT

For the systematic evaluation of the hydraulic drought, precise and formal data of habitual observations of both, variables of the hydrological cycle and those associated with the hydraulic infrastructure are needed. Managing this type of drought requires innovative techniques to assess water resources under extreme conditions. This research was focused on the design of a methodological tool for the evaluation of hydraulic drought. Initially, the search for tools for drought management was intended, identifying 18 environmental indicators and 46 indexes among the most used for monitoring and control, from which seven are selected. Methodological gaps are identified for the evaluation of hydraulics drought through specific indicators. An index is proposed to evaluate the state of water resources during drought events, validated in the Manuel Tames municipality of Guantánamo province, with the purpose of influencing the improvement of the management of this valuable resource supporting the decision-making process.

Keywords: Guantanamo; Hydraulic Drought Index; Hydraulic Drought; Manuel Tames.

Recibido: 10/05/2023

Aceptado: 18/08/2023

Introducción

La sequía es el principal fenómeno resultante de la combinación de eventos meteorológicos, la físico-geografía de un territorio y la acción del hombre sobre el medio. En general, un tipo de sequía ocurre cuando la precipitación es insuficiente para mantener una actividad específica. Se consideran varios tipos de sequías: meteorológica, agrícola, hidrológica, e hidráulica.

La sequía hidráulica es la cual sobreviene cuando la disponibilidad de agua almacenada no permite garantizar el ritmo de entregas considerado en el balance hidrológico anualmente planteado a las fuentes superficiales y subterráneas de todo un territorio y/o sistema hidráulico.

En países como España, México, Colombia y Estados Unidos se han diseñado herramientas de monitoreo basadas en modelos probabilísticos con los que se han podido cuantificar los impactos de episodios de sequía.⁽¹⁾ Este tipo de herramientas emplean algoritmos multiobjetivos y multivariados, principalmente para el análisis de frecuencias, con el propósito de obtener mapas predictivos en términos de amenaza de sequías. Sin embargo, el monitoreo y control de los diferentes tipos de sequías necesitan la implementación de herramientas efectivas que apoyen la toma de decisiones para el enfrentamiento oportuno de este fenómeno natural.⁽²⁾

En el caso de la sequía hidráulica no se dispone de herramientas metodológicas para su evaluación, lo que constituye un importante vacío que la ciencia debe considerar.

En la evaluación sistemática del comportamiento de la sequía hidráulica se necesitan datos precisos y formales de observaciones habituales de algunas variables del ciclo hidrológico, además de otras asociadas a la infraestructura hidráulica.⁽³⁾ En estas condiciones uno de los mecanismos más relevantes, que además es el único con que se cuenta en Cuba y otros países en vías de desarrollo para detectar tempranamente una sequía hidráulica es el monitoreo constante de todos los elementos del sistema hidrológico.

A pesar de los esfuerzos realizados hasta la fecha se recaba una mayor y más efectiva gestión con la integración de todos los sectores, además de la necesidad de la toma oportuna de decisiones, respaldada por resultados científicos; siendo necesaria la implementación de herramientas efectivas para el monitoreo y control de los diferentes tipos de sequías para enfrentar esta amenaza natural.⁽⁴⁾

La complejidad es una característica inherente de la sequía y su gestión, ello se manifiesta desde la propia definición y caracterización del episodio, pasando por sus efectos e impactos, que derivan en distintos niveles de vulnerabilidad y la necesaria participación intersectorial en las iniciativas de gestión que engloban diferentes ámbitos y tipos de medidas. La evaluación de la gestión de la sequía, por tanto, debe incluir diferentes niveles de análisis y debe captar las especificidades del contexto.⁽⁵⁾ El objetivo de la presente investigación es diseñar una herramienta metodológica para la evaluación de la sequía hidráulica, de manera que favorezca el procesamiento y análisis con vistas a facilitar la toma de decisiones dentro del proceso de gestión en materia de administración de recursos hídricos.

Materiales y métodos

La herramienta propuesta es un índice (índice de sequía hidráulica, ISHDr) que mide el déficit de precipitaciones caídas y embalsadas en varias escalas temporales, de modo que se pueden considerar los impactos que el déficit de lluvias puede ocasionar sobre el desarrollo económico y social del área de estudio. Para su desarrollo se asumió la metodología propuesta por García y Balmaseda (2013), por considerar su desarrollo sencillo y confiable.

Los siete indicadores seleccionados por su influencia directa o indirecta en el comportamiento de la sequía hidráulica se agrupan en indicadores climáticos e indicadores físicos.⁽⁶⁾

- Indicadores climáticos: se relacionan con los factores climatológicos, particularmente con el comportamiento de la variable meteorológica precipitación (lluvia) por ser el factor común entre los distintos tipos de sequía.
- Indicadores físicos: comprende elementos relacionados con el nivel del cauce de las corrientes superficiales, el nivel de los mantos acuíferos, de los embalses, factores geológicos, la cobertura forestal y la relación demanda-disponibilidad. Elementos con influencia directa en el comportamiento de la sequía hidráulica ⁽⁷⁾.

Para la asignación y jerarquización de pesos relativos para cada indicador se utilizó la opinión de expertos mediante el método Delphi, el que resulta muy conveniente cuando no existe posibilidad de que los participantes acudan de conjunto a una sesión de trabajo, o cuando resulta conveniente limitar al mínimo la interrelación entre los participantes de la sesión.

Para la aplicación de esta técnica se organizó un comité de expertos, valorando su especialidad y grado científico a través del *Currículum vitae*, a estos les fue entregada la propuesta de indicadores y un cuestionario para valorar cómo influye cada indicador en la sequía hidráulica a partir de la jerarquización en una escala del cero (menos importante) al cuatro (más importante).

Para la selección de la escala de valores para cada indicador se asignó un puntaje a los posibles resultados de cada indicador, incluyendo los intermedios. Con ello se obtuvo una escala para cada indicador. Se decidió asignar el valor uno para representar el estado más satisfactorio del indicador, cinco para el estado intermedio y diez para el menos satisfactorio (tabla 1).

Tabla 1- Escala de valores de los indicadores

| Factores climáticos | | Nivel de cauces superficiales | | Factor geológico | |
|-------------------------|--------|---------------------------------|--------|---------------------------|--------|
| Rango | Escala | Tipología | Escala | Condición | Escala |
| > 100 mm | 1 | Cauce de avenida | 1 | Permeable | 1 |
| 50 - 100 mm | 5 | Cauce Promedio | 5 | Poco permeable | 5 |
| > 50 mm | 10 | Cauce de Estiaje | 10 | Prácticamente impermeable | 10 |
| Cobertura forestal | | Nivel de las aguas subterráneas | | Demanda-disponibilidad | |
| Rango | Escala | Estado | Escala | Condición | Escala |
| > 80 % | 1 | Normal | 1 | Satisface totalmente | 1 |
| 20 - 80 % | 5 | Desfavorable | 5 | Satisface parcialmente | 5 |
| 20 < % | 10 | Crítico | 10 | No satisface | 10 |
| Volumen de los embalses | | | | | |
| Rango | Escala | | | | |
| > 80% | 1 | | | | |
| 50 y 80% | 5 | | | | |
| < 50% | 10 | | | | |

El ISH se calculó como la sumatoria de los pesos relativos de cada indicador multiplicado por el valor ponderado según la escala de puntuación para medir el grado o magnitud del comportamiento del indicador según la siguiente ecuación:

$$ISHdr = \sum_i^n P_i \times E_i$$

donde:

i: indicador del 1 al 7

P_i: peso relativo de cada indicador

E_i: escala de puntuación para medir el grado o magnitud del comportamiento del indicador.

Los valores del ISHdr oscilan entre 1 y 10, siendo más favorables los resultados más cercanos al 1.

Se estableció una clasificación de la sequía hidráulica basada en cuatro categorías en orden ascendente y una escala de colores para la representación cartográfica del estado de la sequía hidráulica (tabla 2)

Tabla 2- Clasificación de la sequía hidráulica

| Clase | Rango de valores ISHdr | Clasificación | Categoría | Escala de colores |
|-------|------------------------|---------------|-----------|-------------------|
| 1 | 0 - 2.5 | Leve | I | Verde |
| 2 | 2.5 - 5 | Moderada | II | Amarillo |
| 3 | 5 - 7.5 | Intensa | III | Anaranjado |
| 4 | 7.5 - 10 | Muy intensa | IV | Rojo |

El índice se validó en la provincia de Guantánamo, Cuba, específicamente en el municipio Manuel Tames, considerando que es el municipio con mayor extensión superficial de la provincia (1071 km² que representan el 17 % de la extensión superficial total de Guantánamo), tiene el tercer mayor número de habitantes, y sus

fuentes de abasto se deprimen de forma cíclica, por lo que, según sus condiciones hidrológicas es uno de los municipios con mayor riesgo de sequía hidráulica.⁽⁸⁾

El municipio Manuel Tames se encuentra en la parte central de la provincia Guantánamo. Limita al Norte con el municipio Sagua de Tánamo, provincia Holguín y con el municipio de Yateras de la provincia Guantánamo; al Este con el municipio San Antonio del Sur, al Sur con los municipios San Antonio del Sur y Caimanera; hacia el Oeste limita con los municipios de Guantánamo y El Salvador. Las precipitaciones en el área oscilan entre 1000 y 1200 mm anuales. La temperatura media anual fluctúa entre 25°C y 27°C, y la humedad relativa anual es de 74 %. El régimen de alimentación de los ríos es pluvial por lo que su caudal varía según el régimen de precipitaciones.⁽⁹⁾

Resultados y discusión

El resultado de la asignación y jerarquización de pesos relativos para cada indicador se presenta en la tabla 3.

Tabla 3- Criterios a considerar en la sequía hidráulica y pesos relativos

| Factores | No. | Indicador | Comentarios | Pesos relativos |
|-------------------|-----|--|---|-----------------|
| CLIMÁTICOS | 1 | Factores climáticos (FC) | Comportamiento de las precipitaciones (total mensual) | 0,16 |
| FÍSICOS | 2 | Factores geológicos (FG) | Permeabilidad de las rocas | 0,13 |
| | 3 | Nivel del cauce de las corrientes superficiales de agua (NC) | Régimen fluvial | 0,13 |
| | 4 | Nivel de las aguas subterráneas (NA) | Variación de los niveles estáticos de los pozos de sondeo | 0,15 |
| | 5 | Volumen de los embalses (VE) | Por ciento de llenado de los embalses | 0,17 |
| | 6 | Cobertura forestal (CF) | Por ciento de cobertura respecto al área total | 0,12 |
| | 7 | Relación demanda-disponibilidad (DD) | Satisfacción de la demanda de los usuarios | 0,14 |

En este caso el indicador nivel de las aguas subterráneas es el de menor peso según el criterio de los expertos, esto se debe a que la validación del índice se realiza en la provincia de Guantánamo; por lo que posee el peso relativo más bajo para este ejercicio ya que la provincia solo explota el 0,004 % del agua subterránea, ⁽¹⁰⁾ mientras que los indicadores nivel del embalse y factores climáticos son los más significativos, particularmente el nivel del embalse considerando el peso que tiene en el abasto esta variable, y su variación estacional, por lo que en época de sequía, debido al déficit de precipitaciones, hay que prestarle mayor atención, de aquí que el nivel de agua embalsada sea aspecto primordial de exhaustivo seguimiento.⁽⁶⁾

En este municipio la cobertura de abasto de agua se comporta de la siguiente manera: de un total de 38 642 habitantes tienen conexión domiciliaria 16 255 hab. (42 %), fácil acceso 14 022 hab. (36 %), servicio público 8 053 hab. (21%) y sin cobertura 312 hab. (1 %). El ciclo promedio del agua es de 8 días y el tiempo de respuesta al fallo es de 15 días.⁽⁸⁾

Tomando esta situación como punto de partida se decide aplicar el índice propuesto en la evaluación del proceso de sequía hidráulica en el municipio Manuel Tames durante el período lluvioso del año 2022.

El año 2022 se caracterizó por un periodo lluvioso relativamente seco, donde solo precipitó el 19,6 % de la lluvia media anual y en la estación poco lluviosa el 11,2 %, prevaleciendo los días secos (lluvia cero) en más del 92,3 %, acompañado esto de una tasa de evaporación alta con valores de 2 250 milímetros (mm). Según la escala de valores propuestas para este indicador el valor definido es de 5.

En la tabla 4 se presentan los valores mensuales de las lluvias caídas (en mm) en Manuel Tames, Guantánamo, desde diciembre de 2021 a noviembre de 2022.

Tabla 4- Valores mensuales de las lluvias caídas en el área de estudio (en mm)

| Data | Período poco lluvioso | | | | | Período lluvioso | | | | | | |
|-------------------|-----------------------|------|------|------|------|------------------|------|------|------|------|------|------|
| | 2021 | 2022 | 2022 | 2022 | 2022 | 2022 | 2022 | 2022 | 2022 | 2022 | 2022 | 2022 |
| | Dic | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Sep | Oct | Nov |
| Media mensual | 63,9 | 78,1 | 20,4 | 10,5 | 10,1 | 59,8 | 54,2 | 39,2 | 36,2 | 54,7 | 74,9 | 55,1 |
| Escala de valores | 5 | 5 | 10 | 10 | 10 | 5 | 5 | 10 | 10 | 5 | 5 | 5 |

En el análisis del factor geológico se determinó que el área de estudio está compuesta por una gran diversidad geológica, destacando nueve formaciones, entre las que predominan por su extensión las formaciones Yateras, Maquey y San Luis. Hidrogeológicamente las rocas de la formación San Luis son impermeables, donde se pueden alcanzar gastos de 1 Ls^{-1} . De aquí que se considere este indicador como un aspecto relevante en el análisis.

A partir del mapa hidrogeológico de la provincia Guantánamo, se determinó para Manuel Tames el litofacial predominante de vulcanógenos, terrígenos y metamórficos no cársicos de naturaleza impermeables. Por lo que se le otorga según la escala un valor de 10 (tabla 5).

Tabla 5- Comportamiento del indicador Factor geológico, por sectores.

| Sectores | Litofacial | | Permeabilidad | Escala |
|----------|-----------------------|------------|---------------------------|--------|
| Sector 1 | Vulcanógeno | No Cársico | Prácticamente impermeable | 10 |
| Sector 2 | Carbonatado | Cársico | Permeable | 1 |
| Sector 3 | Clástico | No Cársico | Poco permeable | 5 |
| Sector 4 | Vulcanógeno | No Cársico | Prácticamente impermeable | 10 |
| Sector 5 | Clástico | No Cársico | Poco permeable | 5 |
| Sector 6 | Carbonatado-terrígeno | Cársico | Permeable | 1 |
| Sector 7 | Terrígeno | No Cársico | Prácticamente impermeable | 10 |
| Sector 8 | Terrígeno | No Cársico | Prácticamente impermeable | 10 |
| Sector 9 | Terrígeno | No Cársico | Prácticamente impermeable | 10 |

La red fluvial del municipio está compuesta por los ríos Guaso, Salao y Yateras. Es extensa, conformada por ríos de diferentes órdenes, arroyos y cañadas, la mayoría de los cuales pasa la mayor parte del año en caudal mínimo debido a que la principal fuente de alimentación es pluvial.⁽⁸⁾ A esta red tributan, además, cañadas y arroyos que no alcanzan un nivel de importancia hidrológica debido a que sus caudales se activan en épocas de intensas lluvias. En esta investigación la mayor parte del año de estudio el régimen fluvial estuvo en caudal de estiaje (tabla 6).

Tabla 6- Comportamiento del indicador nivel del cauce

| Sectores | 2021 | 2022 | 2022 | 2022 | 2022 | 2022 | 2022 | 2022 | 2022 | 2022 | 2022 | 2022 |
|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | Dic | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Sep | Oct | Nov |
| Sector 1 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| Sector 2 | 5 | 10 | 10 | 5 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| Sector 3 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 5 |
| Sector 4 | 10 | 10 | 5 | 10 | 10 | 5 | 5 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| Sector 5 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 5 |
| Sector 6 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 5 | 5 | 10 | 10 | 10 | 10 | 5 |
| Sector 7 | 5 | 10 | 10 | 5 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| Sector 8 | 10 | 10 | 10 | 10 | 5 | 5 | 5 | 10 | 10 | 10 | 10 | 5 |
| Sector 9 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 5 |

La evaluación de las aguas subterráneas se realizó a través del gráfico de control de balance de agua subterránea; a partir de este método se estableció la escala de valores. Según se presenta en la tabla 7, la mayor parte del área de estudio trascurrió durante el año 2022 en estado desfavorable y crítico, fundamentalmente en los meses de julio a noviembre. La alimentación producto de las precipitaciones juega un papel secundario, aunque en los períodos de lluvia, se aprecia que estas contribuyen a la recarga del manto acuífero. Es importante destacar que las reducciones de las lluvias de hasta un 14 % repercuten de manera severa en la recuperación de las aguas subterráneas ^(11,12) de aquí la relevancia de este indicador.

Tabla 7- Comportamiento del indicador nivel de las aguas subterránea

| Sectores | 2021 | 2022 | 2022 | 2022 | 2022 | 2022 | 2022 | 2022 | 2022 | 2022 | 2022 | 2022 |
|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | Dic | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Sep | Oct | Nov |
| Sector 1 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| Sector 2 | 5 | 10 | 10 | 5 | 10 | 10 | 10 | 10 | 5 | 10 | 5 | 10 |
| Sector 3 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 10 | 10 | 10 | 10 | 5 | 5 |
| Sector 4 | 10 | 10 | 5 | 10 | 10 | 5 | 5 | 10 | 5 | 10 | 5 | 10 |
| Sector 5 | 5 | 1 | 10 | 1 | 10 | 10 | 5 | 5 | 10 | 1 | 10 | 10 |
| Sector 6 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 5 | 5 | 10 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| Sector 7 | 5 | 10 | 10 | 5 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| Sector 8 | 5 | 5 | 1 | 1 | 5 | 5 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| Sector 9 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |

Al analizar el volumen de los embalses el análisis recae sobre los embalses Faustino Pérez y Clotilde, los que desde diciembre del 2021 se encontraban en situaciones desfavorables, y transcurridos los primeros cuatro meses de 2022 entraron en su fase más crítica, hasta su cierre del mes de octubre, momento en que comienza a entrar en la fase media. Este indicador está condicionado al comportamiento de los gráficos de despacho de los embalses, y teniendo en cuenta su desempeño se le asignó el valor 5 (tabla 8).

Tabla 8- Porcentaje de llenado de los embalses del municipio Manuel Tames, Guantánamo

| Embalses | 2021 | 2022 | 2022 | 2022 | 2022 | 2022 | 2022 | 2022 | 2022 | 2022 | 2022 | 2022 |
|-------------------|------|------|------|------|-------|------|------|------|-------|------|-------|------|
| | Dic | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Sep | Oct | Nov |
| Faustino Pérez | 38,2 | 37,8 | 36,6 | 35,2 | 34,12 | 32,2 | 36,1 | 39,6 | 41,2 | 42,8 | 44,5 | 43,8 |
| Clotilde | 8,5 | 7,6 | 6,2 | 6,8 | 6,1 | 8,1 | 9,6 | 11,2 | 10,34 | 13,5 | 16,15 | 18,5 |
| Total | 46,7 | 45,4 | 42,8 | 42 | 40,22 | 40,3 | 45,7 | 50,8 | 51,54 | 56,3 | 60,65 | 62,3 |
| Escala de Valores | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 |

La cubierta original de bosques del territorio ha sido degradada a vegetación secundaria, en la zona de Jamaica, Manuel Tames y Romelie, donde se encuentran áreas fuertemente antropizadas. Los resultados del comportamiento de este

indicador para el área de estudio se presentan en la tabla 9; el 44 % del área de estudio al cierre del 2022 tenía coberturas entre el 22 y el 54%.

Tabla 9- Comportamiento del indicador cobertura al cierre de 2022 en el municipio Manuel Tames, Guantánamo

| Sectores | Cobertura Forestal | Escala | Sectores | Cobertura Forestal | Escala |
|----------|--------------------|--------|----------|--------------------|--------|
| Sector 1 | 86 | 1 | Sector 6 | 19 | 10 |
| Sector 2 | 54 | 5 | Sector 7 | 44 | 5 |
| Sector 3 | 12 | 10 | Sector 8 | 22 | 5 |
| Sector 4 | 90 | 1 | Sector 9 | 18 | 10 |
| Sector 5 | 22 | 5 | | | |

La valoración del comportamiento del indicador demanda-disponibilidad se realizó a partir de la información recogida en el balance de agua anual. El balance de agua para los 9 sectores definidos, durante el periodo de análisis se encontraba con bajos niveles de satisfacción de la demanda. Como se observa en la tabla 10, predominaron los meses en los que no se satisfacen las demandas.

Tabla 10- Comportamiento del indicador disponibilidad – demanda en el municipio Manuel Tames, Guantánamo desde diciembre de 2021 a noviembre de 2022

| Sectores | 2021 | 2022 | 2022 | 2022 | 2022 | 2022 | 2022 | 2022 | 2022 | 2022 | 2022 | 2022 |
|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | Dic | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Sep | Oct | Nov |
| Sector 1 | 5 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 5 | 5 | 5 |
| Sector 2 | 1 | 10 | 10 | 10 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 10 | 10 | 1 |
| Sector 3 | 1 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 1 |
| Sector 4 | 5 | 5 | 10 | 10 | 10 | 10 | 5 | 5 | 5 | 10 | 10 | 1 |
| Sector 5 | 5 | 5 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 5 |
| Sector 6 | 5 | 5 | 10 | 10 | 5 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| Sector 7 | 5 | 10 | 10 | 10 | 5 | 10 | 10 | 10 | 10 | 5 | 5 | 10 |
| Sector 8 | 1 | 5 | 5 | 10 | 10 | 10 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| Sector 9 | 1 | 10 | 10 | 10 | 5 | 5 | 10 | 10 | 10 | 5 | 10 | 5 |

Como consecuencia de la escasez de agua, ocurrió una disminución de los rendimientos agrícolas, se reportan condiciones inadecuadas de pastoreo, así como baja rentabilidad de los trabajos y de las inversiones agrícolas.

La tabla 11 presenta el resultado de la aplicación del ISHdr para el año hidrológico 2021-2022. Se refleja el comportamiento de la sequía hidráulica en el municipio Manuel Tames, Guantánamo, por meses y sectores, desde diciembre del 2021 hasta noviembre del 2022.

Tabla 11- Resultados del cálculo del ISHdr en Manuel Tames, Guantánamo, para el año hidrológico 2021-2022

| Indicador | Pi | P. poco lluvioso | | | | | P. lluvioso | | | | | | |
|--|-----|------------------|------|------|------|------|-------------|------|------|------|------|------|------|
| | | Dic. | Ene. | Feb. | Mar. | Abr. | May. | Jun. | Jul. | Ago. | Sep. | Oct. | Nov. |
| FC | 0,2 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| FG | 0,1 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 1 | 5 | 1 |
| NC | 0,1 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 1 | 5 |
| NA | 0,2 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 5 | 5 |
| VE | 0,2 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| CF | 0,1 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 1 | 1 | 1 |
| DD | 0,1 | 10 | 10 | 10 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| ISHdr = $\sum_{i=1}^7 P_i \times E_i$ | | 8,0 | 8,0 | 8,0 | 7,3 | 7,3 | 6,6 | 6,6 | 6,6 | 6,6 | 5,6 | 4,9 | 4,9 |
| Categoría | | IV | IV | IV | III | III | III | III | III | II | III | II | II |

La tabla muestra los indicadores de la sequía hidráulica, estos permiten comparar los diferentes episodios, y revelan que, a partir de diciembre de 2021, y durante los tres primeros meses del año hidrológico el área de estudio estuvo bajo condiciones de sequía hidráulica muy intensa hasta el mes de marzo, donde pasó a condiciones de sequía intensa por un periodo de siete meses. Para fines del periodo evaluado la sequía hidráulica baja a la categoría de moderada, lo que podría ser indicio de una paulatina recuperación.

De los nueve sectores o zonas del área de estudio, cuatro se categorizan como de sequía muy intensa (el 44 % del territorio), dos sectores se encuentran en sequía intensa (22 %) y tres en categoría de moderada (33 %). Este resultado permitió un proceso de superposición de capas digitales y análisis estadísticos, que permite elaborar la cartografía final del área de estudio (figura 1).

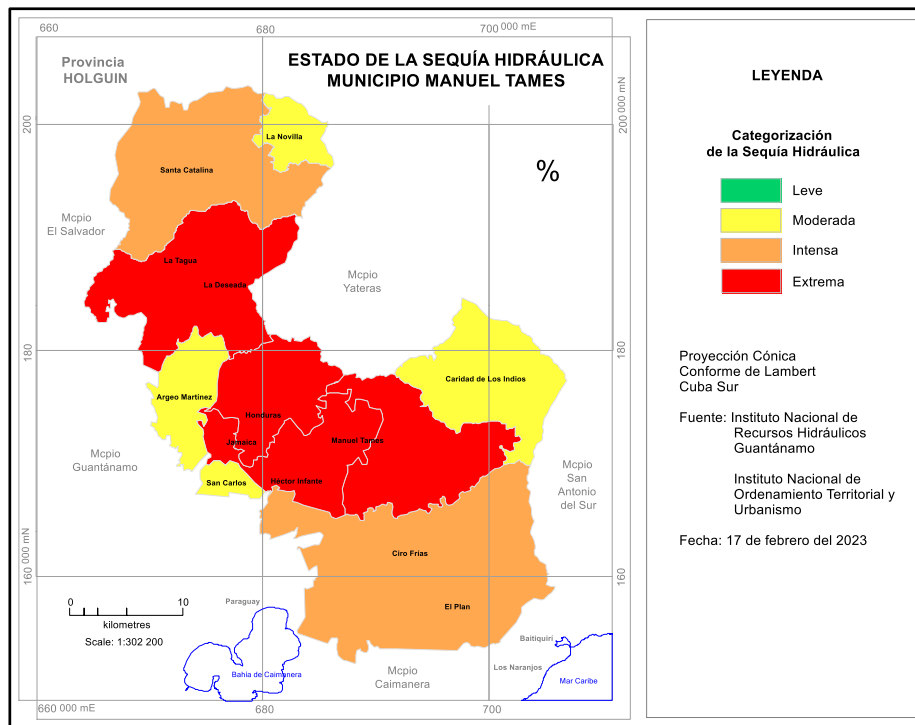


Fig.1- Resultado de la aplicación del ISHdr según áreas de influencia de la sequía

La herramienta propuesta permite presentar datos e informaciones de una forma simplificada y efectiva tanto para los tomadores de decisiones como al público en general y así mejorar el entendimiento de las realidades que abordan el fenómeno de la sequía hidráulica. Propicia que las decisiones sean más exactas, concentrar los esfuerzos en las áreas de mayor impacto, economizar recursos, establecer prioridades dentro del proceso de gestión potenciando las observaciones científico-prácticas.

En el desarrollo del ISHdr se toma como referencia principal el Índice simplificado de Gestión de Cuencas (IsGC) propuesto por García Fernández en 2011. Este índice no resulta conveniente para la gestión propia de la sequía hidráulica, ya que fue concebido para determinar la evolución ambiental de las Cuencas de Interés Nacional, basado en indicadores del comportamiento de recursos naturales y la actividad socioeconómica (suelos, superficie boscosa, agua y saneamiento, carga

contaminante, inversiones ambientales, entre otros). No obstante, la metodología para su concepción constituye referente para el presente trabajo.

En territorios donde existen ecosistemas semidesérticos, desérticos o están expuestos con frecuencia a extremas sequías, o bien están multiamenazados, la evaluación de la sequía hidráulica debe implicar a especialistas de entidades con el encargo estatal de la vigilancia del clima y la provisión de agua; además del uso de los indicadores relacionados con factores climáticos, forestales, aguas superficiales, subterráneas, nivel de embalse, siendo clave la relación demanda/disponibilidad, y una evaluación proactiva de los riesgos asociados a los niveles de sequía.

Conclusiones

La aplicación del Índice de Sequía Hidráulica en el municipio Manuel Tames para un año hidrológico corroboró la conveniencia y funcionalidad de su aplicación, demostrándose que desde diciembre de 2021 hasta noviembre de 2022 el área de estudio sufrió los efectos de una sequía persistente de moderada hasta muy intensa. La cartografía generada constituye una herramienta eficaz para la toma de decisiones oportunas en cuanto a la gestión de recursos hídricos.

Referencias bibliográficas

1. RAVELO, A. y col. Monitoreo y Evaluación de las Sequías en América Central. Estudio de Caso: Corredor seco de El Salvador, Honduras y Nicaragua. Luxemburgo: Oficina de Publicaciones de la Unión Europea, 2016. 55 p. ISBN 978-92-79-59410-6 Disponible en: https://www.euroclima.org/images/Publicaciones/LibrosEUROCLIMA/JRC_Monitoreo-Evaluacion-Sequias_AmericaCentral.pdf
2. VÁZQUEZ-MONTENEGRO, R., J. y col. El peligro por sequía agrícola en la provincia de La Habana. *Revista Cubana de Meteorología*, 2019, **25**(3), Disponible en: <http://rcm.insmet.cu/index.php/rcm/article/view/485/750>

3. FERRER, E. Herramientas para el monitoreo y control de sequías: un metaanálisis en contexto. *Agua y Territorio/Water and Landscape*, 2023, 22, p. 229-250. Disponible en: <https://revistaselectronicas.ujaen.es/index.php/atma/article/view/7045/7603>
4. FONSECA, C. Las condiciones de sequía y estrategias de gestión en Cuba. 2013. Disponible en: http://www.ais.unwater.org/ais/pluginfile.php/571/mod_page/content/88/Cuba_2_2.pdf.
5. MÉNDEZ, O. y col. Enfrentamiento a la sequía operacional en la empresa Aguas de La Habana. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 2018, 39(2), p. 112-123. Disponible en: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1680-03382018000200009
6. GARCÍA HIDALGO, Y.; BALMASEDA ESPINOSA, C., E. Índice simplificado de gestión de la cuenca del río Naranjo, municipio Majibacoa, provincia Las Tunas. *Revista ciencias técnicas agropecuarias*, 2013, 22 (1), p. 45-49. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/932/93225708006.pdf>
7. MARTÍNEZ VALDÉS, Y.; VILLALEJO GARCÍA, V. M. La gestión integrada de los recursos hídricos: una necesidad de estos tiempos. *Ingeniería hidráulica y ambiental*, 2018, 39(1), p. 58-72. ISSN 1680-0338. Disponible en: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1680-03382018000100005
8. INSTITUTO NACIONAL DE RECURSOS HIDRÁULICOS (INRH). Informe de Estrategia para la Gestión Integrada del Recursos Agua en condiciones de sequía hidráulica según asentamientos de la provincia, 2021, p.18 – 33. Archivo Central de la Delegación Provincial de Recursos Hidráulicos Guantánamo.
9. EMPRESA DE APROVECHAMIENTO HIDRÁULICO (EAH) Guantánamo. (2022): Balance de agua Anual aprobado para cada usuario de la provincia. OSDE Gestión Integrada de las Aguas terrestres. Formato Digital. 11 - 29 pp.
10. RUIZ, J.F.; MELO, J.Y. Informe de predicción climática a corto, mediano y largo plazo en Colombia. Grupo de modelamiento de tiempo y clima, subdirección de meteorología-IDEAM. 2021. Disponible en: http://bart.ideam.gov.co/wrfideam/new_modelo/cpt/informe/informe.pdf

11. PÉREZ, D. La explotación del agua subterránea. Un nuevo enfoque. EduSol. 2017, **18(65)**. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=475756935015>.

12. NÚÑEZ, S.B.; CRESPO, M.; BLANCO, J.L.; COLLAZO, J.C. Evaluación de las reservas de agua subterránea en el área la Ceiba-Certeneja de Güirabo, Holguín. 2019, julio. DOI:10.13140/RG.2.2.35737.24168.

Conflictos de interés

Los autores declaran que no hay conflictos de intereses

Contribución de los autores

Esvilleg Ferrer-Pozo: conceptualización, curación de datos, investigación, validación, redacción - borrador original

Liliana Gómez-Luna: conceptualización, investigación, supervisión, redacción - revisión y edición.

Yudith González-Díaz: análisis formal, investigación, supervisión, redacción - revisión y edición.