

**Aplicación del modelo CE QUAL-W2:
una aproximación a la estructura
térmica en el embalse Miguel
Martínez Isaza, Concordia, Antioquia,
Colombia**

**Application of CE QUAL-W2 Model: An
Approach to the Thermal Structure in the
Miguel Martínez Isaza Reservoir, Concordia,
Antioquia, Colombia**

Mateo Parra-Cuadros ¹, Nora E. Villegas-Jiménez ²
Esnedy Hernández-Atilano ³, Néstor J. Aguirre-Ramírez ⁴
y Fabio de J. Vélez-Macías ⁵

Recibido: 05 de abril de 2019
Aceptado: 8 de agosto de 2019

Cómo citar / How to cite

M. Parra-Cuadros, N. E. Villegas-Jiménez, E. Hernández-Atilano, N. J. Aguirre-Ramírez y F. Vélez-García, “Aplicación del modelo ce-qual-w2: una aproximación a la estructura térmica en el embalse Miguel Martínez Isaza, Concordia, Antioquia, Colombia”, *TecnoLógicas*, vol. 22, no. 46, pp. 99-113, 2019. <https://doi.org/10.22430/22565337.1222>

¹ Ingeniero Ambiental, Grupo GeoLimna, Facultad de Ingeniería, Escuela Ambiental, Universidad de Antioquia, Medellín-Colombia, mateo.parra@udea.edu.co

² M.Sc. en Ingeniería Ambiental, Grupo GAIA, Facultad de Ingeniería, Escuela Ambiental, Universidad de Antioquia, Medellín-Colombia, nora.villegas@udea.edu.co

³ PhD en Biología, Grupo GeoLimna, Facultad de Ingeniería, Escuela Ambiental, Universidad de Antioquia, Medellín-Colombia, esnedy.hernandez@udea.edu.co

⁴ PhD en Ciencias Naturales, Grupo GeoLimna, Facultad de Ingeniería, Escuela Ambiental, Universidad de Antioquia, Medellín-Colombia, nestor.aguirre@udea.edu.co

⁵ PhD en Geografía Énfasis en Ordenamiento Territorial, Grupo GeoLimna, Facultad de Ingeniería, Escuela Ambiental, Universidad de Antioquia, Medellín-Colombia, fabio.velez@udea.edu.co

Resumen

La modelación de la temperatura contribuye a la gestión de embalses, ya que es posible crear escenarios con diferentes condiciones para predecir su respuesta ante los cambios climáticos y los procesos de mezcla. Con este trabajo se busca aportar elementos de análisis del funcionamiento e identificación de los forzantes que dominan la dinámica térmica de un embalse tropical de montaña. Se registró la temperatura y el nivel de agua en tres sitios del embalse durante tres muestreos. Además, se midieron los caudales de entrada y salida al embalse y se analizaron los registros climáticos históricos. Con esta información se construyeron los archivos de entrada del modelo bidimensional CE QUAL-W2, para simular cuatro escenarios climáticos (seco, lluvia, transición y el fenómeno El Niño). De las afluencias se evidenció que la quebrada Santa Mónica en términos hidrodinámicos ejerce su efecto hasta el sitio de captación; de otro lado, la quebrada la Nitrera presenta recirculaciones verticales que aumentan el tiempo de residencia lo que tiene consecuencias en la calidad del agua para este sector del embalse. Los resultados de este ejercicio preliminar de modelación indican que el comportamiento térmico del embalse responde de manera diferenciada según el escenario climático y la magnitud de las extracciones. Durante el fenómeno El Niño y ante un incremento del agua captada, el embalse disminuye el nivel de agua en cerca de un metro y aumenta su temperatura alrededor de 3°C en la zona central del embalse. Ante la tendencia de crecimiento del municipio, se espera mayores demandas de agua que deberán ser suplidas por el embalse, por lo que toman importancia las herramientas de modelación que apoyen la gestión ambiental y reduzcan el riesgo al desabastecimiento ante la vulnerabilidad al cambio de climático.

Palabras clave

CE-QUAL-W2, Hidrodinámica, embalse, conservación del agua, cambio climático, análisis estadístico.

Abstract

Hydrodynamic modelling of temperature is a tool that contributes to the management of reservoirs because it is possible to create scenarios with different conditions to predict the behavior facing the meteorological changes and the mixing processes. This work seeks to contribute elements of analysis to the functioning and identification of the external factors that dominate the thermal dynamics of a tropical reservoir of mountain. The temperature and the water level were registered in three places of the reservoir, during three campaigns of sampling. In addition, we measured the inflows and outflows to the reservoir and analyzed the climatic historical records. With this information the two-dimensional model CE QUAL-W2 archives was build, in order to simulate 3 climatic periods (dry, transition and wet) and one where El Niño is included. It is clearly demonstrated that Santa Mónica creek has a greater influence in the water extraction. The external factors like the increase of the water extraction and the climatic scenarios influence the temperature and availability of the reservoir, being El Niño scenario the most critical, where the reservoir approximately increases its temperature 3°C and the level of the water diminishes a meter. The reservoir is increasingly susceptible to the shortage of supplies and the decrease of quality in the scenes of drought with the increase of the resource demand. The model is a useful management tool of the reservoir for the future scenarios of climate change.

Keywords

CE-QUAL-W2, hydrodynamic, water management, reservoir, climate change, statistical analysis.

1. INTRODUCCIÓN

Colombia ha sido reconocida por su abundante oferta hídrica. A finales del siglo XX el país ocupaba el cuarto lugar en el mundo por disponibilidad per cápita de agua y, de acuerdo con un informe de la ONU, está en el puesto 24 entre 203 países como potencia hídrica [1], [3].

A pesar de esto, el crecimiento de la demanda, las variaciones climáticas extremas como sequías e inundaciones y el manejo inadecuado del recurso, han generado los problemas actuales relacionados con el desabastecimiento de agua y la afectación de fuentes hídricas naturales [4]. En el año 1982 se presentó un evento de desabastecimiento en el municipio de Concordia cuando su única fuente de agua potable, la quebrada la Nitrera, se secó completamente, motivando a crear un embalse que asegurara el líquido vital para su población, el cual se incorporó al sistema de acueducto del municipio. El embalse lo conforma la represa Miguel Martínez Isaza, que se encuentra dentro de la reserva natural La Nitrera, una zona protegida de más de 100 hectáreas [5] y está alimentado por dos quebradas: La Nitrera y Santa Mónica; además, cuenta con una torre de captación que conduce el agua al sistema de acueducto municipal.

A pesar de la construcción del embalse, se presentan nuevos retos en el manejo del cuerpo de agua: la creciente demanda y la reducción en la oferta hídrica debido al cambio climático o los fenómenos extremos. Por tanto, se presenta la necesidad del uso de herramientas de pronóstico, que ofrezcan un grado de confianza para la toma de decisiones, ya sea en la ordenación de las cuencas o para exigir criterios de diseño de obras e infraestructuras, capaces de soportar y funcionar adecuadamente en situaciones de emergencia. Estos pronósticos pueden apoyar las alertas que emiten los servicios de protección civil, que establecen protocolos de actuación ante

posibles situaciones de peligro por intensas lluvias o sequías [6]–[8].

Este trabajo busca describir el funcionamiento del sistema, mediante la aproximación al comportamiento hidrodinámico a partir de la modelación, explorando los regímenes de precipitación y temperatura, para elegir escenarios de modelación adecuados y generar una herramienta que complemente las decisiones de manejo y gestión sobre el cuerpo de agua. Se usa el modelo hidrodinámico y de calidad de agua CE-QUAL-W2, ya que tiene un mejor ajuste en embalses relativamente largos y estrechos que muestren cambios de calidad longitudinal y vertical [9]. Este modelo ha sido aplicado en por lo menos 32 ocasiones en cuerpos de agua colombianos [10], en embalses como el Amaní [11], Porce II [12] y proyectos hidroeléctricos como Urra I [13].

2. METODOLOGÍA

2.1 Área de estudio

El embalse Miguel Martínez Isaza se encuentra en el municipio de Concordia ubicado a 97 kilómetros de Medellín en el suroeste de Antioquia, noreste de Colombia (Fig. 1).

El municipio, localizado sobre la vertiente oriental de la Cordillera Occidental, tiene un área de 243 km², altitud sobre el nivel del mar de 2000 metros en la cabecera municipal, temperatura promedio de 19 °C y una pluviosidad de 2000 mm/año, correspondiente a una zona de vida de bosque húmedo montano bajo [5]. Para la conservación del embalse y su cuenca aportante se gestiona la creación del Parque Natural la Nitrera. El embalse se creó en 1986 y se construyó durante seis años, con una capacidad de almacenamiento de 76.850 m³, según

estudios realizados por la empresa AAS S.A. para el Plan Maestro de Acueducto y Alcantarillado (PMAA) del municipio [14].

2.2 Sitios y periodos de muestreo

Se realizaron tres muestreos en cinco sitios del embalse y en diferentes épocas climáticas del año. Los muestreos se hicieron el 15 y 16 de septiembre de 2016 (transición de lluvia a sequía), 5 y 6 de diciembre de 2016 (transición de sequía a lluvias) y 23 y 24 de febrero de 2017 (sequía). Un sitio de muestreo se encuentra sobre la quebrada la Nitrera a 0,15 metros de profundidad (*Nit*), dos en las entradas de las quebradas que alimentan el embalse a 2,4 metros de profundidad (*Eni*) y en perfil (*Mon*), en la zona central a 1,9 y 8 metros de profundidad respectivamente (*Cen1* y *Cen 2*) y sobre la estructura de captación de agua hacia la planta de potabilización a 6,5 metros de profundidad (*Cap*) (Fig. 2).

2.3 Información hidrometeorológica

Los ciclos diurnos de temperatura en el cuerpo de agua se tomaron con sensores HOBO, ubicados en la capa superficial y el fondo en los periodos de muestreo, la batimetría se levantó con una Ecosonda Humminbird 858c, el coeficiente de extinción de luz se determinó a partir de perfiles levantados con un Cuantómetro Li-1400 Licor. Los datos meteorológicos de magnitud y dirección del viento, temperatura del aire, temperatura de rocío, precipitación y nubosidad, se obtuvieron de los registros en la estación meteorológica Concordia [15], con mediciones a las 7, 13 y 19 horas de cada día en los años 2016 y 2017; esta estación se encuentra a unos 5 kilómetros del embalse. Los datos faltantes se completaron con la interpolación de datos de igual hora del día anterior y el día siguiente al faltante [16], [17].

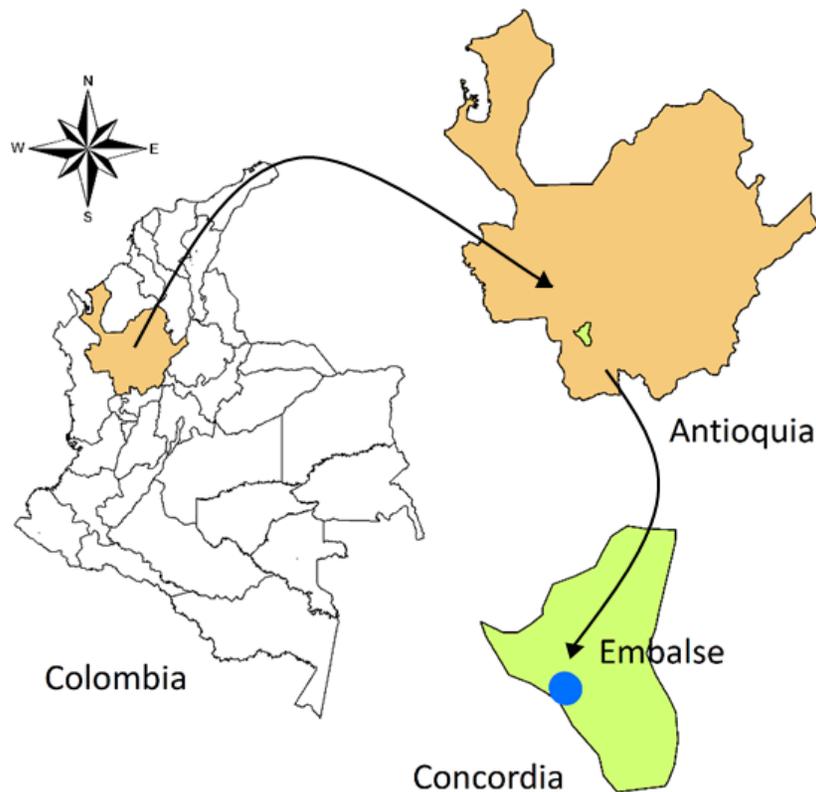


Fig. 1. Localización del área de estudio. Fuente: autores.

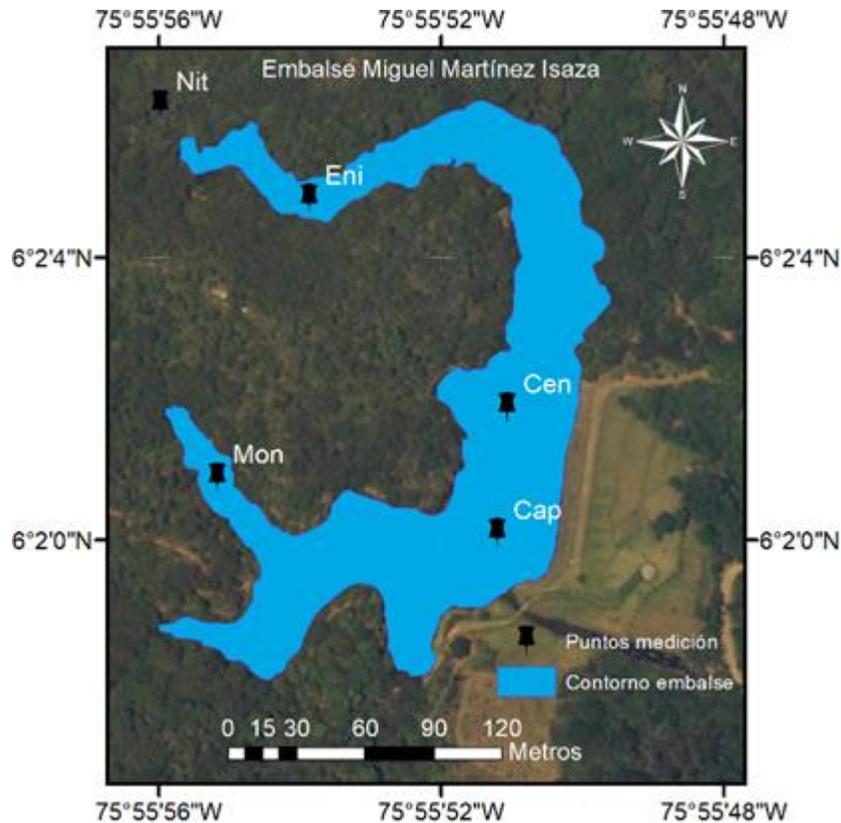


Fig. 2. Puntos de medición en el embalse. Lugares de medición en el embalse con su respectiva profundidad de medición en metros. Fuente: autores.

Se contó con registros de caudal a la entrada (sitios *Mon* y *Nit*) [14] y para completar los datos de los periodos faltantes se realizó una regresión lineal con la precipitación que presenta alta correlación con el caudal [18]–[20]. El caudal de salida se considera constante e igual a la extracción del caudal promedio diario que va a la planta de potabilización con 9,68 L/s, según el Plan de manejo ambiental del embalse (Fig. 3).

La serie de la temperatura de los afluentes al embalse se determinó mediante la relación con la temperatura ambiente y la temperatura registrada por los sensores HOBO instalados en las corrientes (sitios *Mon* y *Nit*), donde se identifica una diferencia promedio de 2°C menos en el agua.

2.4 Batimetría

La morfometría del embalse se levantó con el uso de la ecosonda, y se elaboró el modelo de elevación digital del vaso del embalse usando el software ArcGis [21]. A partir del registro de coordenadas y profundidad en 1825 puntos se construye el modelo de triangulación vectorial (TIN) y luego se convierte al modelo digital de elevación (DEM). A partir del modelo de elevación digital se realiza la segmentación del cuerpo de agua y se determina el ángulo y la longitud de cada segmento con la extensión COGO de ArcGIS. Para ingresar la batimetría al modelo se transforma el archivo a la extensión .CSV requerida por el modelo mediante el uso de un complemento para Excel incluido en el modelo (Fig. 4.)

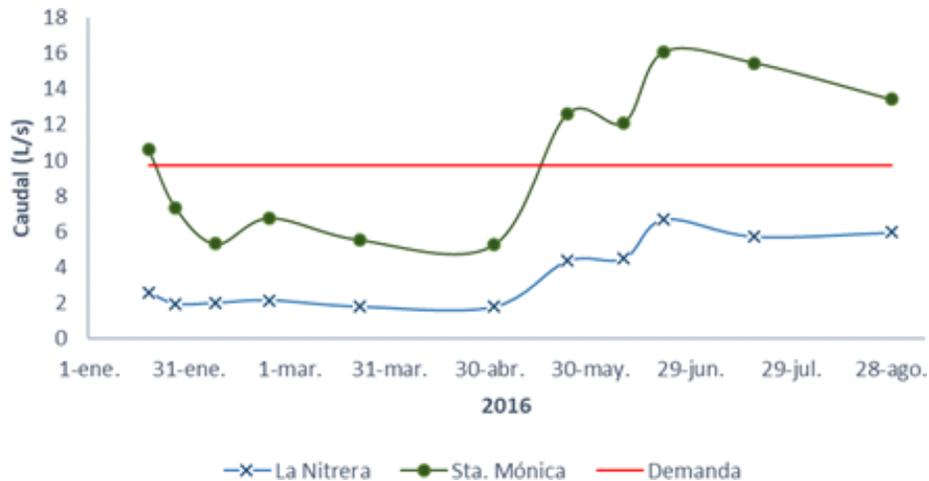


Fig. 3. Caudales medidos en los afluentes del embalse y la demanda proyectada. Fuente: Alcaldía de Concordia.

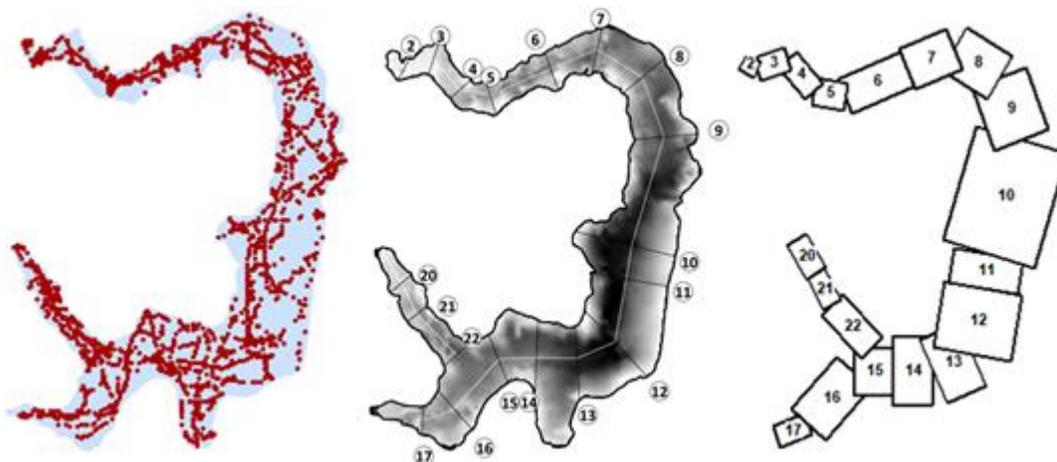


Fig. 4. Izquierda: puntos tomados para elaborar la batimetría. Centro: segmentación en ArcGIS. Derecha: segmentación del modelo. Fuente: autores.

2.5 Archivos de entrada del modelo

Los archivos de entrada del modelo se editaron en Notepad ++ [22], ya que permite diferenciar y visualizar mejor las variables en el lenguaje Fortran el cual es sensible a errores por algún espacio o símbolo extra.

Los principales archivos de entrada son: datos meteorológicos (temperatura ambiente y de punto de rocío, nubosidad, dirección y magnitud del viento), batimetría del embalse con la medida del ancho de cada segmento y altura de cada capa, caudal y temperatura de los afluentes, caudal de extracción por la captación, las dimensiones de las

estructuras hidráulicas y se ingresan coeficientes como el de atenuación de luz en el agua y de sombrío.

La segmentación del embalse se realizó verificando la homogeneidad geométrica de los segmentos. Se dividió en 23 segmentos y dos ramas como en Fig. 4.

Cada segmento se divide en sentido vertical en capas, en este caso las capas son de 0,5 mts. Esta altura se definió a partir de los perfiles de luz y temperatura, que indicaron que no se presentan termoclinas. Se muestra el segmento 12 que tiene una profundidad aproximada de 8 m. y en su capa 11 se encuentra la captación como en (Fig. 5).

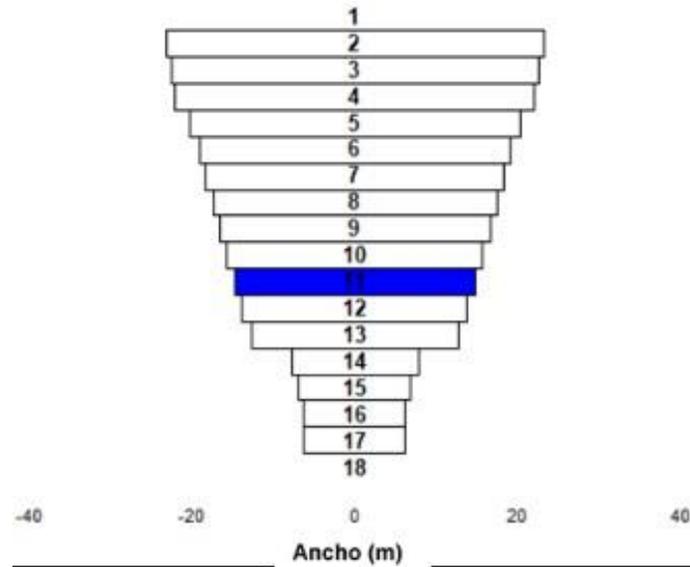


Fig. 5. Segmento número 12 dividido en capas, con la captación en la capa 11. Fuente: autores.

Se incluyeron dos estructuras hidráulicas en el modelo, la primera es la extracción o torre de captación (*withdrawal*) ubicada en el segmento número 12 y la capa 11, que capta el agua hacia la planta de potabilización, y la segunda es el vertedero (*spillway*) que controla el nivel de agua del embalse, rebotando por un canal cuando el nivel supera la cota 2095 m.s.n.m. Para los dos casos el agua que pasa por la estructura sale del sistema.

2.6 Calibración

Se realiza un ejercicio de calibración del modelo por medio del ajuste de parámetros que inciden en la temperatura como lo son: el coeficiente de protección de viento (WSC), la radiación absorbida en la capa superficial (BETA), la sombra (SH) y el coeficiente de extinción (EXH2O). El coeficiente WSC es el que tiene más efecto en la temperatura durante la calibración, se usa entre 0,5 y 0,9 para vegetación de dosel denso y montañoso [23], [24].

El desempeño del modelo para la predicción de la temperatura del embalse se calcula por medio del estadístico error medio absoluto (AME) mostrado en la

ecuación (1); este es el mejor indicador de desempeño del modelo, ya que es directamente interpretable y se ha aplicado a múltiples casos de estudio [9], [25]. Utilizando (1):

$$AME = \frac{\sum |Valor\ predicho - Valor\ observado|}{número\ de\ observaciones} \quad (1)$$

2.7 Escenarios climáticos para la simulación

Con el fin de identificar los escenarios de modelación se realizó un análisis estadístico exploratorio de las variables climatológicas entre 1980 y 2016 de la estación meteorológica Concordia del IDEAM [15] y un análisis espectral, que permite ver separadamente la contribución de los procesos en las series de tiempo que se ejecutan a diferentes velocidades [26], y un método para analizar la potencia de cada espectro en toda la serie de tiempo es el método de ondas o *Wavelets*.

En el análisis exploratorio se identificó que en la zona de estudio se presenta un régimen de precipitación bimodal, con mayores precipitaciones en octubre y mayo.

Además, se encuentra una diferencia de aproximadamente de 1,5 °C para el mes de febrero de la comparación de las

temperaturas registradas en el 2016, año de muestreo, con el ciclo mensual multianual desde 1970 (Fig. 6) indicando un evento de temperatura atípica, coincidiendo con un valor del Oceanic Niño Index (ONI) reportado para el primer trimestre del año de 2,2 [27].

Adicionalmente, el análisis espectral indica picos de temperatura con una periodicidad de 48 meses en toda la serie de tiempo (Fig. 7 – Elipse punteada). Estos picos de temperatura de la serie de tiempo tienen valores del ONI mayores a 1.5, considerados como fenómenos El Niño fuertes [28]. Además, se observa la influencia en 6 y 12 meses que son las periodicidades normales del ciclo bimodal (Fig. 7).

Las características bimodales del régimen climático y la ocurrencia del fenómeno El Niño fuerte tienen efectos en la región; por lo tanto, se eligieron los escenarios de simulación planteados.

Se utilizó la información del muestreo del 5 y 6 de diciembre de 2016 (transición de sequía a lluvias) y 23 y 24 de febrero de 2017 (sequía) para las calibración y validación respectivamente. Los escenarios simulados son lluvia y el fenómeno El Niño. Para ambos escenarios se consideraron dos condiciones de extracción: caudal promedio para el año 2016 de 19,68 L/s y un caudal de 22,83 L/s que según el plan de manejo ambiental (PMA) está

proyectado para el 2027 en el municipio de Concordia (un aumento de 16 %).

3. RESULTADOS

En la primera aproximación de calibración del modelo se realizaron simulaciones variando los parámetros que inciden en la temperatura del embalse para elegir los valores adecuados donde se ajusten los valores simulados y observados (ver Tabla 1) y se prueba el desempeño del modelo. Las corridas del modelo con estos parámetros muestran que el ajuste probado es aceptable para representar el comportamiento de la estructura térmica del embalse.

Tabla 1. Parámetros que indican en la temperatura del embalse con su respectivo valor elegido.

Fuente: autores.

Parámetro	Abreviatura	Valor elegido
Coefficiente de protección de viento	WSC	0.5
Radiación absorbida en la capa superficial	BETA	0.75
Sombra	SH	0.6
Coefficiente de extinción	EXH20	0.2

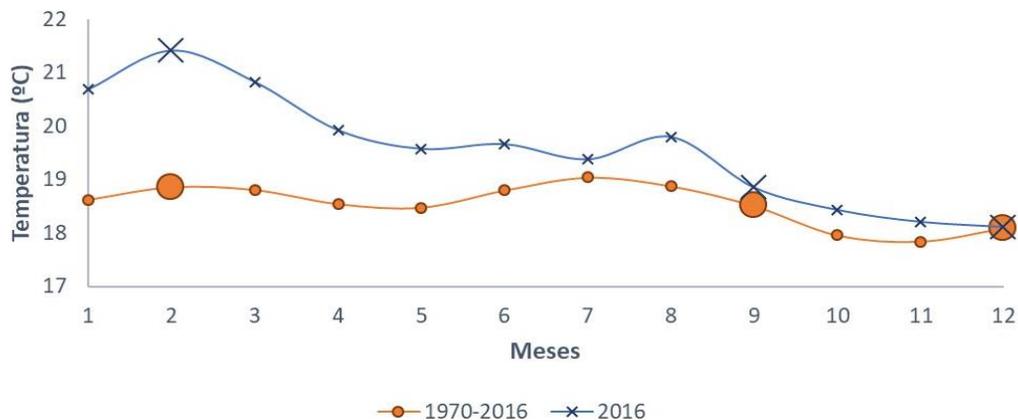


Fig. 6. Comparación de la temperatura de 2016 (círculos) con el ciclo mensual multianual desde 1970 (equis), se señalan los meses de muestreo (círculos en negrita). Fuente: autores.

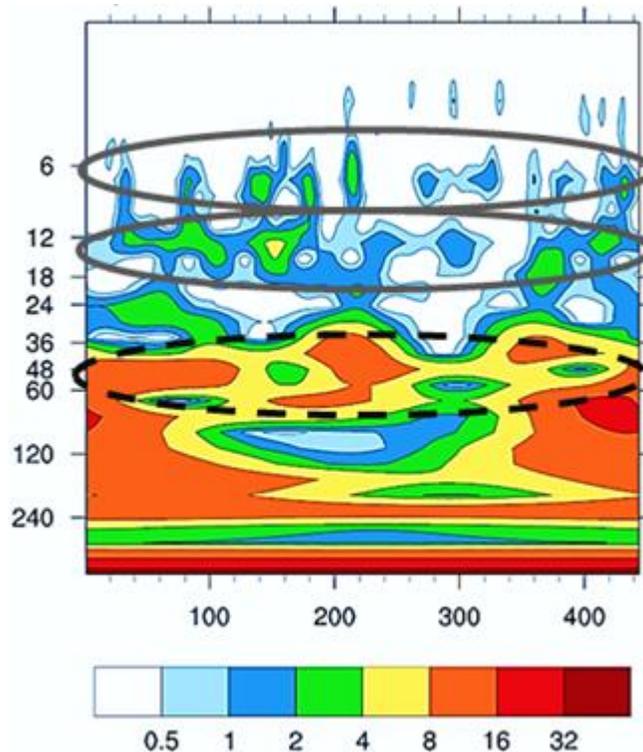


Fig. 7. Espectro de ondas para la temperatura, representa la periodicidad de las frecuencias que afectan la serie de tiempo. Elipses grises: Periodicidad de 6 y 12 meses. Fuente: autores.

Los valores del AME para el centro del embalse y la quebrada La Nitrera variaron entre 0,06 y 0,55, a modo de ejemplo se presenta para el sitio Centro del embalse (*Cen1*, *Cen2*) (Fig. 8).

La estructura térmica del embalse está íntimamente relacionada con el comportamiento de los flujos de masa en su interior, los cuales quedan representados por el campo de velocidades a lo largo de éste.

Para ilustrarlo se presentan los vectores de velocidad para el escenario de lluvias a medio día (Fig. 9), donde se evidencia que forzantes como el viento y la torre de captación generan las mayores magnitudes de la velocidad, lo que propicia procesos de mezcla dentro del cuerpo de agua.

En el corte longitudinal mostrado, se aprecia la convergencia de dos corrientes superficiales en la capa superior (primeros tres metros de profundidad), también se marca una diferencia del segmento 9 hacia la derecha debido a la influencia de la

forma de cuerno del embalse, que va desde el centro del embalse hasta la quebrada la Nitrera (Fig. 4).

En la parte derecha se nota una mezcla interna que no interactúa con el centro del embalse, esto puede generar mayores tiempos de retención hidráulica (Fig. 9).

De otro lado, se nota la influencia de la torre de captación en las direcciones de la velocidad, donde se aprecia que el agua que entra desde la quebrada Santa Mónica a la izquierda se profundiza y se dirige hacia la captación, donde se presenta la mayor magnitud vertical de la velocidad (capa 7-Segmento 12) (Fig. 9).

El comportamiento de la temperatura en los periodos climáticos se explica a partir de la variación en el centro del embalse, ya que es el lugar de mayor profundidad donde se tiene la posibilidad de mostrar mejor los cambios de temperatura en perfil. A mediodía, se nota que el escenario de El Niño tiene en promedio temperaturas de 3 °C por encima del resto.

En el periodo de transición se presentan las temperaturas más bajas y se comporta de manera similar al periodo seco en cuanto a los cambios de temperatura con la profundidad.

El comportamiento de la temperatura en los periodos climáticos se explica a partir de la variación en el centro del embalse, ya que es el lugar de mayor profundidad donde se tiene la posibilidad de mostrar mejor los cambios de temperatura en perfil. A mediodía, se nota que el escenario de El Niño tiene en promedio temperaturas de 3 °C por encima del resto.

En el periodo de transición se presentan las temperaturas más bajas y se comporta de manera similar al periodo seco en cuanto a los cambios de temperatura con la profundidad.

En el periodo de lluvia se da el cambio más drástico en la temperatura en 1,8 metros de profundidad, el cual sugiere que el aumento de precipitaciones trae consigo mayores velocidades del viento, que mezclan la superficie del embalse. Este cambio de temperatura a 1,8 metros se presenta en los otros periodos, pero con menor magnitud, lo que indica que se tiene una termoclina débil [29], [30].

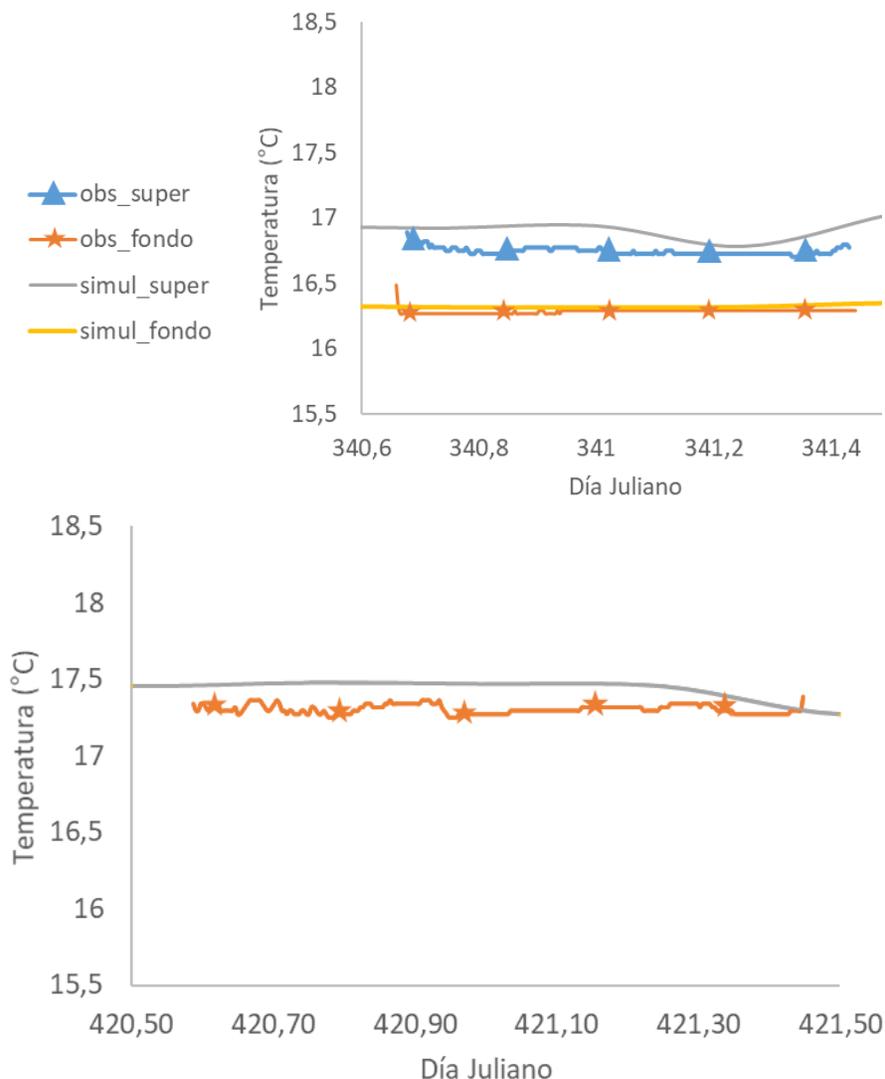


Fig. 8. Calibración el 5 y 6 de diciembre (izquierda) y validación el 23 y 24 de febrero (derecha) de la temperatura en el centro del embalse. *Obs_super*: observada en superficie, *obs_fondo*: observada en el fondo, *simul_super*: simulada en superficie y *simul_fondo*: simulada en el fondo. Fuente: autores.

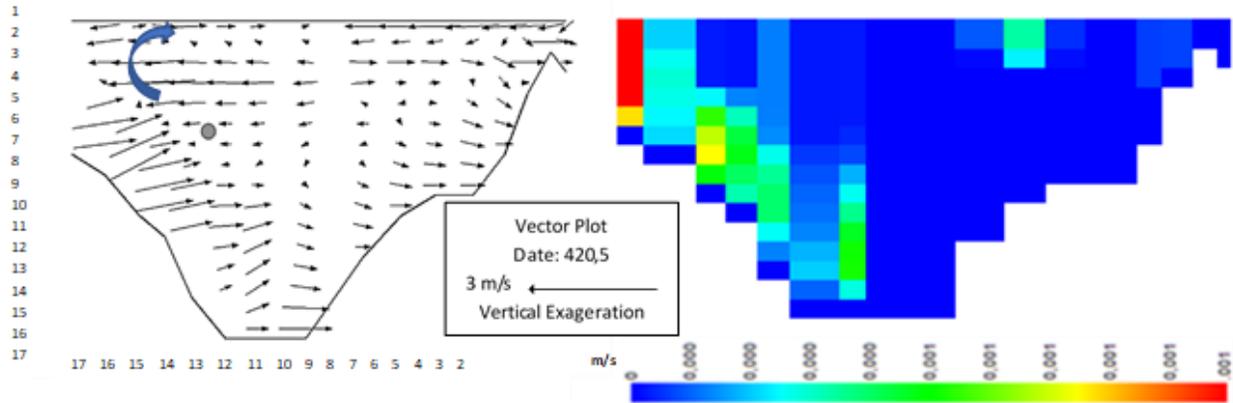


Fig. 9. Comportamiento de la velocidad a lo largo del embalse en época de lluvia. Izquierda: vectores de velocidad del agua dentro del embalse con la torre de captación (círculo). Derecha: magnitud de velocidades en el embalse. Fuente: autores.

Se observa que en el escenario El Niño el nivel del embalse bajó aproximadamente un metro, la temperatura es más homogénea que el resto debido al bajo nivel del embalse, haciéndolo más susceptible a la mezcla, lo que podría traer resuspensión de sedimentos en la zona litoral que deterioren la calidad del agua del embalse [31] (Fig. 10).

Por otro lado, se observan diferencias en el comportamiento día-noche (a las 12 y 19 horas) (Fig. 10). En la noche se ve en general un aumento de temperatura (en promedio $0.8\text{ }^{\circ}\text{C}$) comparado con el día, un factor causante de esto podría ser la liberación de la energía que almacena durante el día. En la noche, por el efecto del viento, se nota una mezcla en la capa superficial, en tanto que en el día se presentan cambios graduales de temperatura en esta capa.

Se compara el comportamiento térmico a lo largo del embalse en el periodo de lluvia y El Niño a medio día (Fig. 11). En el escenario de lluvia en la parte superior derecha del embalse (más cercano a la

quebrada la Nitrera) se evidencian diferencias espaciales en el comportamiento térmico del embalse mostrando una tendencia de aumento de temperatura en el periodo de El Niño, pero con la temperatura más homogénea, en tanto que en las épocas de lluvias se evidencian diferencias de temperatura entre los distintos sectores.

El efecto de un incremento del caudal de extracción sobre el comportamiento térmico se ilustra para el escenario de lluvia y el Niño (Fig. 10); en este se observa que el aumento de la extracción disminuye la temperatura en los dos casos, aproximadamente $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$, lo que puede no ser significativo para el metabolismo del embalse. Además, el nivel del embalse baja aproximadamente 2 metros más en el mes de abril (escenario El Niño) cuando se aumenta la extracción. Se puede inferir que una pérdida de volumen del embalse hace que sea más susceptible para atender la demanda en sequías fuertes provocadas por este fenómeno.

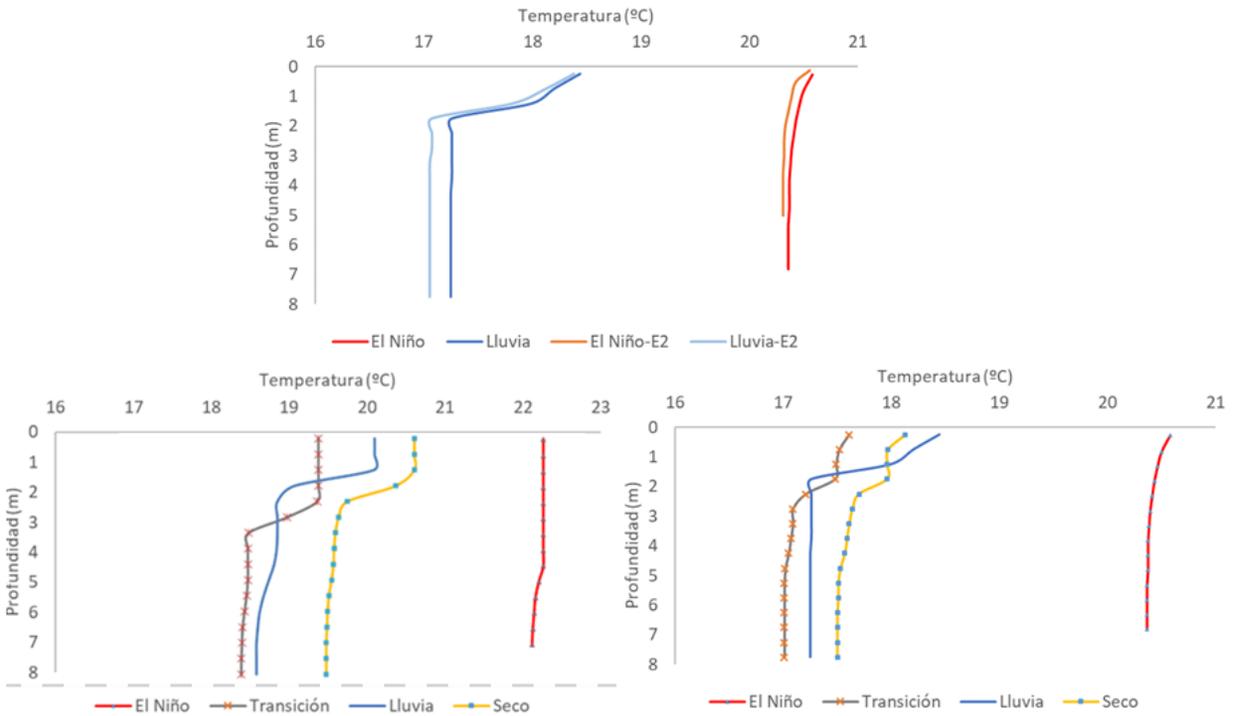


Fig.10. (a) perfil de temperatura en el centro del embalse a las 7 de la noche en escenarios climáticos diferentes. (b): perfil de temperatura en el centro del embalse a las 12 del mediodía en escenarios climáticos diferentes. (c). Perfil de temperatura en el escenario El Niño y lluvias (extremos), comparados con estos mismos simulados con el caudal de extracción aumentado (E2). Fuente: autores.

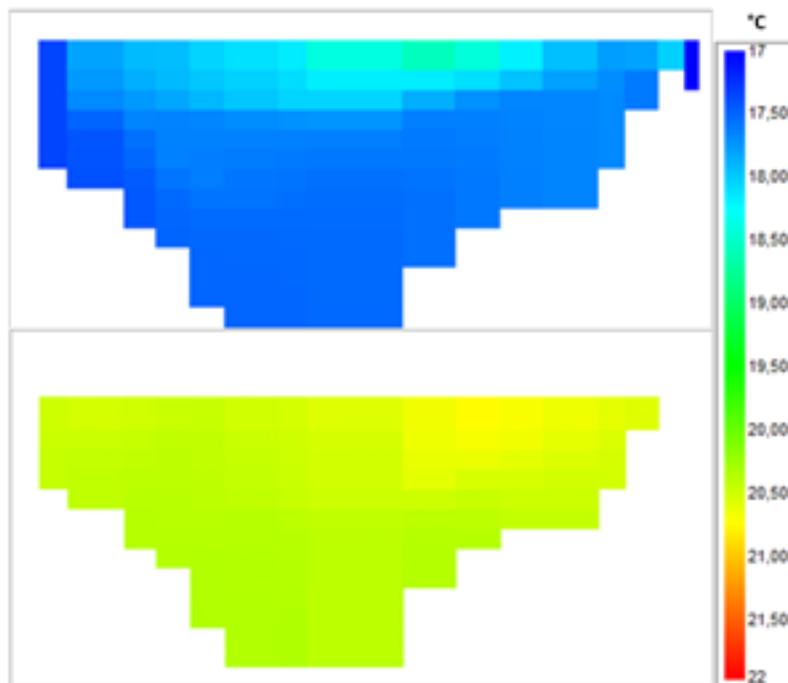


Fig. 11. Comportamiento térmico a lo largo del embalse. En la parte superior la época de lluvia. En la parte inferior, en fenómeno El Niño. Fuente: autores.

4. CONCLUSIONES

Los resultados de la modelación del embalse permiten concluir que su comportamiento térmico está influenciado por el cambio de los periodos climáticos, se presenta una disminución en el volumen del embalse y la homogenización en el Fenómeno del Niño y en el escenario de aumento de la demanda de agua. Espacialmente, hay cambios en la velocidad del embalse por su forma. En términos de los forzantes externos, el viento influye en la temperatura superficial del embalse y la captación cambia las velocidades y temperaturas internas dentro de este.

La disponibilidad hídrica del embalse Miguel Martínez Isaza es cada vez más vulnerable por el aumento de la demanda, el aumento tendencial de la temperatura y a la ocurrencia de fenómenos de sequía, como consecuencia se afecta la calidad de agua. El embalse se homogeniza cuando su volumen es bajo generando posiblemente resuspensión de sedimentos en las zonas litorales.

Se propone priorizar el monitoreo de calidad de agua de la quebrada Santa Mónica, debido a que su posición de afluente al embalse tiene mayor influencia en la captación. Así mismo, las corrientes de viento pueden generar que el material que llega al embalse se acumule en la entrada de la quebrada la Nitrera, por la dirección del viento y el cambio drástico que tiene la forma del embalse en la interacción de esta parte con el centro, generando la posibilidad de descomponerse y causar afectación en la calidad del cuerpo de agua.

Con la proyección de la demanda de agua propuesta en el Plan de Manejo, el municipio es vulnerable al desabastecimiento de agua si se presentaran futuros eventos de El Niño. Por esto se sugiere crear programas de sensibilización con la comunidad para mitigar los efectos de estos eventos.

El uso de herramientas computacionales, como la presentada, es de utilidad en los planes para la gestión del embalse ya que permite la creación de escenarios con eventos climáticos extremos donde se evalúan los efectos en la calidad y el nivel del embalse. Para esto se recomienda realizar un seguimiento continuo de las variables hidrometeorológicas especialmente de la velocidad y dirección de viento del cual no se tiene registro en la estación Concordia, siendo éste un insumo fundamental para conocer la dinámica interna del embalse.

5. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo hace parte del proyecto “Diagnóstico Físico-Biótico del Parque Natural La Nitrera: sistema de abastecimiento de agua del municipio de Concordia” (acta 20-17-17947). Proyecto financiado por el CODI-Comité de Desarrollo de la Investigación-Vicerrectoría de Investigación de la Universidad de Antioquia, en la unión de la Facultad de Salud Pública, el grupo de investigación GeoLimna de la Escuela Ambiental de la Facultad de y la Alcaldía de Concordia. Fecha de inicio del proyecto: septiembre de 2016. A la fecha se sigue trabajando en el embalse y su parque natural.

6. REFERENCIAS

- [1] B. Jiménez and J. G. Tundisi, “Diagnóstico del Agua en las Américas,” in *Red Interamericana de Academias de Ciencias (LANAS), Foro Consultivo Científico y Tecnológico (FCCyT)*, 2012.
- [2] Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales, *Estudio Nacional del Agua 2014*. Bogotá, D.C.: IDEAM, 2015.
- [3] Organización Panamericana de la Salud, “Informe Regional Sobre la Evaluación 2000 en la Región de las Américas. Agua Potable y Saneamiento, Estado Actual y Perspectivas,” Washington D.C., 2001.

- [4] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible and ANDESCO, "Pacto por el Uso Eficiente y Ahorro del Agua," Bogotá, D.C., 2013.
- [5] Alcaldía de Concordia, "Esquema de Ordenamiento Territorial Concordia Antioquia 2001," 2001.
- [6] Dueñas, C. "Marco normativo vigente ante el riesgo de inundaciones. *Jornadas Parlamentarias sobre prevención de riesgos relacionados con el agua: VI-La protección civil ante el riesgo de inundaciones* (1997).
- [7] J. Prats Rodríguez, R. Morales Baquero, J. Dolz Ripollés, and J. Armenol Baquero, "Aportaciones de la limnología a la gestión de embalses," *Ing. del agua*, vol. 18, no. 1, p. 83-97, Aug. 2014.
<https://doi.org/10.4995/ia.2014.3145>
- [8] R. Margalef, *Limnología*. Barcelona: Omega, 1983.
- [9] T. M. Cole and S. A. Wells, "CE-QUAL-W2: A two-dimensional, laterally averaged, Hydrodynamic and Water Quality Model, Version 4.1," Portland, 2016.
<http://www.cee.pdx.edu/w2/>
- [10] T. M. Cole and S. A. Wells, Section: "CE-QUAL-W2: Application by country," *Portland State University*, 2018.
<http://www.cee.pdx.edu/w2/>
- [11] A. Marín Ramírez, "Corrientes de Densidad en el Embalse Amaní y su Influencia en la Estructura Térmica y la Calidad del agua," Thesis, Universidad Nacional de Colombia, 2015.
- [12] S. M. Silva Arroyave, "Evaluación de la calidad del agua del futuro Embalse Porce III por la influencia de la descarga del Embalse Porce II: Modelo de simulación de calidad del agua del futuro embalse Porce III," *Rev. Ing. Univ. Medellín*, vol. 7, no. 13, pp. 21-37, 2008.
- [13] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, *Resolución No. 0838 del 5 de octubre de 1999: Estudios previos Hidroeléctrica Urrea I*, no. 0838. 2000, p. 46.
- [14] Consejo Municipal de Concordia, "Plan de Desarrollo Concordia 2016-2019," 2016.
- [15] IDEAM, "Datos meteorológicos Estación Concordia." IDEAM, Bogotá, Colombia, 2018. <http://www.ideam.gov.co/solicitud-de-informacion>
- [16] E. Eccel, "What we can ask to hourly temperature recording. Part I: Statistical vs. meteorological meaning of minimum temperature," *Ital. J. Agrometeorol.*, no. 2, pp. 41-43, 2010.
- [17] D. Spano, P. Duce, R. L. Snyder, and C. Cesaraccio, "An improved model for determining degree-day values from daily temperature data," *Int. J. Biometeorol.*, vol. 45, no. 4, pp. 161-169, Nov. 2001.
<https://doi.org/10.1007/s004840100104>
- [18] D. Quan, C. Xing, C. Tiexi, and C. Xing-Wu, "Relationship between extremes of precipitation and discharge in the Huaihe River Basin," *J. Nanjing Univ. (Natural Sci)*, vol. 45, no. 6, pp. 790-801, 2009.
- [19] L. Prathumratana, S. Sthiannopkao, and K. W. Kim, "The relationship of climatic and hydrological parameters to surface water quality in the lower Mekong River," *Environ. Int.*, vol. 34, no. 6, pp. 860-866, Aug. 2008.
<https://doi.org/10.1016/j.envint.2007.10.011>
- [20] Z. Zhang, X. Chen, C.-Y. Xu, L. Yuan, B. Yong, and S. Yan, "Evaluating the non-stationary relationship between precipitation and streamflow in nine major basins of China during the past 50 years," *J. Hydrol.*, vol. 409, no. 1-2, pp. 81-93, Oct. 2011.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.07.041>
- [21] ESRI, "ArcGIS Desktop - Program," 2018.
<http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/>
- [22] "Notepad++," 2018.
- [23] S. W. Chung and J. K. Oh, "Calibration of CE-QUAL-W2 for a monomictic reservoir in a monsoon climate area," *Water Sci. Technol.*, vol. 54, no. 11-12, pp. 29-37, Dec. 2006. <https://doi.org/10.2166/wst.2006.841>
- [24] Y. Kim and B. Kim, "Application of a 2-Dimensional Water Quality Model (CE-QUAL-W2) to the Turbidity Interflow in a Deep Reservoir (Lake Soyang, Korea)," *Lake Reserv. Manag.*, vol. 22, no. 3, pp. 213-222, Jan. 2006.
<https://doi.org/10.1080/07438140609353898>
- [25] M. Azmi and N. Heidarzadeh, "Dynamic modelling of integrated water resources quality management," *Proc. Inst. Civ. Eng. - Water Manag.*, vol. 166, no. 7, pp. 357-366, Jul. 2013.
<https://doi.org/10.1680/wama.11.00117>
- [26] D. S. Wilks, *Statistical methods in the atmospheric sciences*, 3rd ed., vol. 100. Academic press, 2011.
- [27] NOAA's Climate Prediction Center, "Cold and Warm Episodes by Season," 2017.
- [28] C. Montes, "La incertidumbre climática y el dilema energético colombiano," *Rev. la Acad. Colomb. Ciencias Exactas, Físicas y Nat.*, vol. 42, no. 165, p. 392-401, Dec. 2018.
<https://doi.org/10.18257/raccefyn.664>
- [29] G. R. Pérez and J. J. R. Restrepo, *Fundamentos de limnología neotropical*, 2nd ed., vol. 15. Universidad de Antioquia, 2008.
- [30] J. G. Tundisi, T. Matsumura-Tundisi, and M. C. Calijuri, "Limnology and management of reservoirs in Brazil," in *Comparative Reservoir Limnology and Water Quality Management*, Dordrecht: Springer Netherlands, 1993. pp. 25-55.
- [112] Tecnológicas, ISSN-p 0123-7799 / ISSN-e 2256-5337, Vol. 22, No. 46, sep-dic de 2019, pp. 99-113

- [31] https://doi.org/10.1007/978-94-017-1096-1_2
J. Armengol, J. J. Rodríguez, J. C. García, J. Ordoñez, and R. Marcé, “La gestión de los embalses en relación a la calidad del agua en condiciones de sequía extrema,” *Ing. del agua*, vol. 16, no. 4, pp. 285–294, Sep. 2009.
<https://doi.org/10.4995/ia.2009.2956>