

EVALUACIÓN Y PREDICCIÓN DE LA TEMPERATURA DEL AGUA DE UN RÍO EN LOS ANDES PERUANOS

1^{er}. Efrain Noa Yarasca, 2^{do}. Diana Chaca Ayuque, 3^{er}. Hugo A. Galvan Ccora, 4^{to}. Ivan A. Ayala Bizarro y 5^{to} Ada Arancibia Samaniego

Universidad Estatal de Oregon, Corvallis, OR 97331, EEUU, enoay7@yahoo.com
Universidad Nacional de Huancavelica, Huancavelica 09001, Perú, 2016151017@unh.edu.pe
Universidad Nacional de Huancavelica, Huancavelica 09001, Perú, 2016151027@unh.edu.pe
Universidad Nacional de Huancavelica, Huancavelica 09001, Perú, ivan.ayala@unh.edu.pe
Universidad Nacional de Ingeniería, Lima 15333, Perú, arancibias@uni.edu.pe

RESUMEN:

La Temperatura de Agua de los Ríos (TAR) es uno de los parámetros más importantes de calidad de agua e indicador de la biodiversidad acuática en una cuenca. El aumento acelerado de la TAR en las últimas décadas, a nivel global, ha dado lugar a trabajos de monitoreo, simulación y predicción, usando diversos modelos. Principalmente desarrollados en otras regiones, los modelos estadísticos de predicción de TAR no han sido validados en ríos andinos. El presente trabajo presenta una evaluación y reajuste de los principales modelos estadísticos de predicción de la TAR, aplicados en la Cuenca Experimental del Río Ichu (CERI). Para este fin, la temperatura del aire se correlacionó con la temperatura del agua del río Ichu, las cuales fueron monitoreadas diariamente durante 16 meses. Se revisaron tres modelos de regresión: el modelo lineal de Stefan & Preud'homme y el modelo logístico (no-lineal) de 3 y 4 parámetros de Mohseni & Stefan. Las simulaciones de la TAR fueron realizadas empleando el modelo hidrometeorológico Soil & Water Assessment Tool (SWAT). Las modificaciones de los modelos fueron configuradas en el código del SWAT y reajustadas empleando la técnica de "Latin Hypercube Sampling". Los modelos estadísticos reajustados mostraron un mejor rendimiento que los predeterminados. Mientras que el modelo lineal predeterminado muestra un Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) de -2.67, los modelos lineales y no-lineal reajustados mostraron valores de NSE por encima a 0.71. Los resultados sugieren que los modelos de predicción de la TAR predeterminados de la literatura deben ser validados en ríos de los andes peruanos.

ABSTRACT:

Stream temperature is one of the most important parameters of water quality and indicator of aquatic biodiversity in the watershed. Worldwide, river temperature increases in recent decades have given rise to monitoring, simulation and prediction work, using various models. Being mainly developed in other regions, statistical models for stream temperature have not been validated in the andean rivers. In this work, we evaluate the main stream temperature statistical models applied in the Ichu River Experimental Watershed (IREW). For this purpose, stream temperature of the Ichu river has been daily monitored for 16 months and correlated with air temperature. Three regression models were reviewed, including the Stefan & Preud'homme linear model and the 3- and 4-parameter Mohseni & Stefan logistic model. Stream temperature simulations were performed employing the hydrological Soil & Water Assessment Tool (SWAT) model. Modifications of the statistical models were conducted into the SWAT code and fitted using the "Latin Hypercube Sampling" approach. The modified statistical models outperformed the default Stefan & Preud'homme model. While the default Stefan & Preud'homme model showed a NSE = -2.67, the improved linear and non-linear models showed NSE values above 0.71. Results suggest that statistical models for stream temperature prediction from the literature should be validated to be used in Andean rivers.

PALABRAS CLAVES: Temperatura del agua, Cuenca río Ichu, andes peruanos, modelo SWAT.

INTRODUCCIÓN

La temperatura del agua de los ríos (TAR) es un parámetro clave de calidad de agua porque es el principal indicador y conductor del ecosistema acuático y además está fuertemente relacionado con los otros parámetros de calidad de agua tales como oxígeno disuelto, salinidad, pH, entre otros (Van Vliet et al., 2013). Cambios significativos de la TAR, fuera de los rangos naturales pueden causar la muerte y/o migración de especies endémicas y el potencial ingreso de especies exóticas que podría conllevar a un desequilibrio ecológico (Wehrly et al., 2009). Incrementos de la TAR en 1 a 2 °C combinados con alteraciones del régimen hidrológico podrían ser letales para el funcionamiento fisiológico de ciertos peces. Además, temperaturas elevadas del agua en los ríos pueden acelerar las reacciones químicas naturales, liberar exceso de nutrientes, incrementar la solubilidad de metales pesados como el cadmio, zinc que son tóxicos para el ecosistema acuático, reducir los niveles de oxígeno disuelto, reducir el pH, incrementar la conductividad, entre otros (Fondriest Environmental Inc., 2014). Una deplorable calidad de agua no solo afecta al ecosistema acuático sino también a la sociedad en salud y economía. En salud ya que al contacto con este tipo de agua pueden adquirir enfermedades dermatológicas. En economía, el tratamiento del agua de mala calidad demandaría mayor costo.

En el contexto del cambio climático, las predicciones estiman que la temperatura del agua de los ríos seguirá en aumento, no solo debido al incremento de la temperatura del aire que tiene efecto directo en la temperatura del agua, sino también debido las actividades humanas como el incremento de efluentes industriales, la instalación de barreras y diques, cambios en el uso del suelo y la sobre explotación del recurso hídrico (Isaak et al., 2018; Samuels et al., 2018). Las proyecciones globales del aumento de la TAR indican incrementos mayores en los EE. UU., Europa, el este de China y algunas regiones de Sud América (Kaushal et al., 2010; Van Vliet et al., 2013). Las proyecciones globales derivadas de diferentes modelos climáticos globales como “Coupled Model Intercomparison Project Phase 3” (CMIP3) y CMIP5 para “Representative Concentration Pathways” (RCPs) de 4.5 y 8.5 indican incrementos de la temperatura de aire en +1.7 ° y +6.7 °C en Sud América (Magrin et al., 2014). Estos incrementos de temperatura del aire, consecuentemente la TAR, podrían agudizar aún más los ya existentes problemas del ecosistema acuático. Por ejemplo, a nivel global, la población de peces de agua dulce ha disminuido en promedio en un 76 % en los últimos 50 años debido a las malas condiciones de los ríos, entre ellos las elevadas temperaturas de agua, barreras de los ríos y la sobreexplotación (Deinet et al., 2020). En América del Sur, esta disminución es aún más preocupante con una reducción del 84 % en la población de peces durante el mismo período (Deinet et al., 2020).

El aumento de la temperatura de los ríos en las últimas décadas ha incrementado el interés de la comunidad científica por establecer modelos predictivos y medidas de mitigación. Estos modelos, principalmente clasificados como mecanísticos y estadísticos, varían de simples a complejos, involucrando muy pocos a numerosas variables, en escalas de tiempo que van de fracciones de horas a escalas anuales, y escalas de espacio local a regional (Isaak et al., 2018). Los modelos mecanísticos son modelos numéricos basados en la física que involucran conceptos de los procesos de balance de agua y energía, mientras que los modelos estadísticos son modelos que establecen relaciones funcionales entre la temperatura del agua y variables meteorológicas y físicas de la cuenca (Boyd & Kasper, 2003; Noa-Yarasca et al., 2021b, 2021a). Los métodos estadísticos se distinguen de los mecanísticos por su simplicidad y menor cantidad de variables predictoras. Dentro de los métodos estadísticos simples de escala diaria tenemos el modelo lineal de Stefan & Preud’homme (Stefan & Preud’homme, 1993), modelo no lineal de 3 y 4 parámetros de Mohseni & Stefan (Mohseni & Stefan, 1999). Otros modelos estadísticos más complejos involucran componentes de autocorrelación, modelos de regresión lineal múltiple, modelos aditivo generalizado, y modelos mixto lineal (Wehrly et al., 2009). Con aceptable precisión, estos modelos fueron principalmente evaluados y verificados en ríos de los Estados Unidos. La TAR de los Andes Sudamericanos ha sido estudiada en mucha

menor proporción que los ríos de otras regiones del mundo. Los andes interrumpen significativamente la circulación atmosférica generando condiciones climáticas particulares a lo largo de las laderas orientales y occidentales y en áreas bajas adyacentes (Garreaud, 2009). En estas condiciones particulares es necesario revisar las ecuaciones de predicción de la temperatura del agua establecidas en la literatura. En el presente trabajo, las principales ecuaciones de predicción de la temperatura del agua de los ríos (ecuaciones de Stefan & Preud'homme Stefan y Mohseni & Stefan) son evaluadas y corregidas para el río Ichu, ubicado en la región de Huancavelica de los Andes Peruanos.

1.1 Objetivos

El presente trabajo presenta una evaluación de los principales modelos estadísticos simples de predicción de la temperatura del agua en los ríos, aplicado al río Ichu dentro de la cuenca experimental del Río Ichu denominado CERI, ubicado en los Andes Peruanos. Después de evaluar, este trabajo también reajustó los coeficientes de los modelos lineales de Stefan & Preud'homme y no lineales de Mohseni & Stefan con los registros monitoreados a escala diaria de la temperatura del agua del río Ichu, a 620 m aguas arriba de la estación hidrométrica de Huancavelica.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Área de Estudio

La CERI, está ubicado en la sierra central del Perú, es parte de la cuenca del río Mantaro, contribuyente del río Amazonas. Esta cuenca, se caracteriza por sus elevadas montañas y valles angostos típicos de los andes sudamericanos. Los picos más altos presentan glaciares permanentes a lo largo del año que mantienen flujos permanentes en las diversas quebradas y ríos tributarios del río Ichu. El área de la cuenca hasta la estación de control Huancavelica (3,675 msnm) es 615.8 km². La CERI se encuentra en la parte central del departamento de Huancavelica y abarca las provincias de Castrovirreyna y Huancavelica (Figura 1). La CERI muestra una cobertura vegetal variada clasificada en diez tipos, de las cuales las más representativas son el pajonal andino y la agricultura costera y andina y menor proporción los bofedales, áreas altoandinas con escasa y sin vegetación, matorrales, lagunas, glaciares, y áreas urbanas (Ayala et al., 2018). La cuenca del río Ichu está principalmente conformada por tres tipos de suelos: suelos aluviales recientes acarreados por los ríos, suelos aluviales antiguos profundos de fertilidad natural baja, y suelos residuales formados por materiales heterogéneos del Terciario y Cuaternario (lutitas, limolitas, areniscas y gravas).

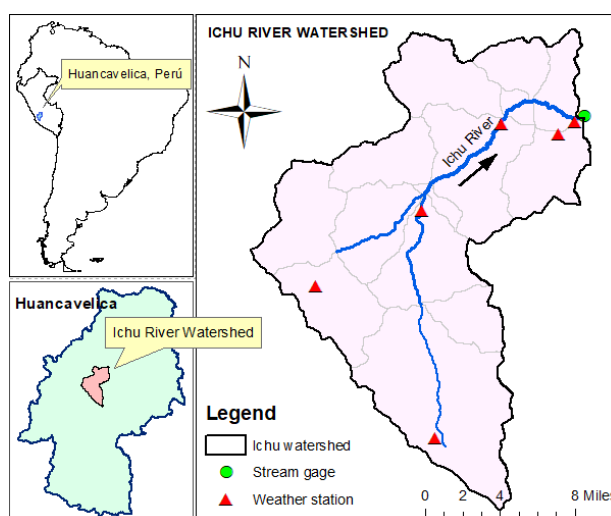


Figura 1.- Izquierda superior, ubicación del departamento de Huancavelica en el Perú. Izquierda inferior, ubicación de la cuenca del río Ichu en el departamento de Huancavelica. A la derecha, ubicación de las

estaciones meteorológicas e hidrométricas en la cuenca del río Ichu. Este mapa está también disponible en versión en línea en: https://noayarae.github.io/whis/projects/ichu_map.html

2.2 Colección y procesamiento de datos

2.2.1 Temperatura del agua del Río Ichu

Las temperaturas del agua fueron monitoreadas en dos puntos del río Ichu (en la estación Huancavelica (E1) y a 620 m aguas arriba (E2)) y dos afluentes de agua termal ubicados a 293.5 m y 327.5 m aguas arriba de E1, respectivamente como muestra la Figura 2. Sin embargo, el presente trabajo descartó emplear los registros del punto E1, debido a la influencia de las fuentes de agua termal. Las temperaturas fueron registradas tres veces por día (7-8 am, 12-1 pm y 5-6 pm) por un período de 16 meses entre 01/01/2000 y 04/30/2021. Las tres mediciones diarias fueron ponderadas y asignadas como temperatura media diaria. Las temperaturas diarias muestran una media de 11.27 °C (SD = 1.16°C) en un rango de 7.40 a 14.35 °C. Las temperaturas bajas fueron principalmente observadas en los meses de junio, julio y agosto (estación de invierno), mientras que las temperaturas altas principalmente en los meses de noviembre a marzo (estación de verano).

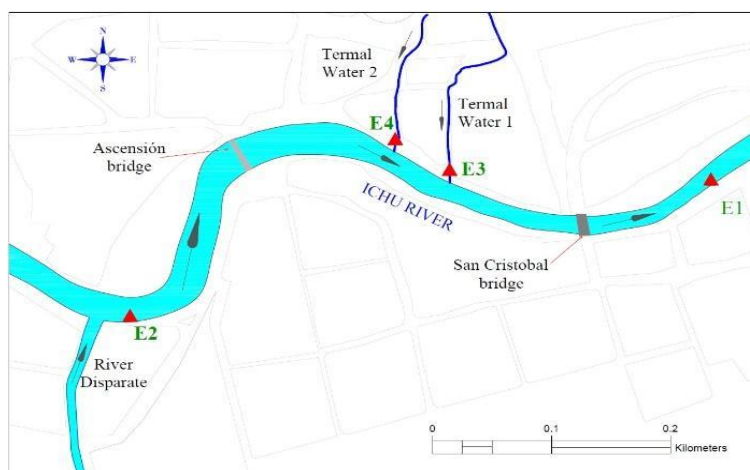


Figura 2.- Puntos de registro y monitoreo de la temperatura del agua en el río Ichu (E1 y E2) y en la desembocadura de dos afluentes de agua termal (E3 y E4)

2.2.2 Precipitación y temperatura del aire

Los registros diarios de precipitación y temperatura del aire estuvieron disponibles en seis estaciones meteorológicas distribuidos en la CERI, desde la fecha 01/01/2016 hasta 31/12/2021, correspondiente a 6 a años (Figura 1). Las coordenadas geográficas de las estaciones se muestran en la Tabla S1 del material suplementario (<https://doi.org/10.5281/zenodo.6988146>). Esta información fue ingresada al modelo “Soil & Water Assessment Tool” (SWAT) para la calibración del flujo y posterior simulación de la temperatura del agua. Las mayores precipitaciones fueron registradas en los meses de noviembre a mayo (estación de verano) y menores precipitaciones de junio a octubre (estación de invierno). Con respecto a las temperaturas del aire, las altas temperaturas se observaron en los meses de diciembre a marzo y las bajas temperaturas en los meses de mayo a septiembre.

2.2.3 Topografía, cobertura de suelo y tipo de suelo.

La información topográfica fue obtenida del modelo de elevación digital (DEM) que fue descargada del repositorio Earthdata de la NASA en formato raster de 12.5x12.5 m de tamaño de celda. La información de cobertura vegetal corresponde a la lectura satelital Landsat 4 y Landsat 7

del año 2010, descargado de la base de datos del sitio web Land Cover Map (Globeland 30 -NGCC) de las Naciones Unidas en formato raster de 30x30 m de tamaño de celda. La información de suelos fue obtenida de la base de datos de “Food and Agriculture Organization of the United Nations” (Fischer et al., 2008) en formato raster de 500x500 m de tamaño de celda.

2.2.4 Descargas del río Ichu

El flujo del río Ichu es medido en la estación de control Huancavelica (E1) (Lat.: -12.7893, Long.: -74.9791). Para fines del presente trabajo se dispuso de información de flujo diario en el período de 01/01/2016 a 12/31/2021 (seis años), de los cuales, los dos primeros años fueron empleados en el entrenamiento del modelo y los siguientes cuatro años en la calibración y validación del modelo. Los caudales diarios muestran una media de 3.26 m³/s (SD = 15.69 m³/s). Los mayores caudales fueron registrados en los meses de diciembre a abril (estación de verano) y los menores caudales registrados en los meses de junio a septiembre (estación de invierno).

2.3 Modelado del flujo y temperatura del agua

2.3.1 Modelado del flujo

El modelado del flujo y la temperatura del agua fueron conducidos empleando el Soil & Water Assessment Tool 2012 (SWAT 2012) (Arnold et al., 2012). Para este fin, la CERI fue dividida en catorce sub cuencas, con áreas en el rango de 5.38 km² a 136.20 km². Usando el DEM, la pendiente topográfica fue calculada y clasificada en tres rangos (0 - 5%, 5 - 15%, 15 - 30% y >30%). Ingresando la información de cobertura de suelo y tipo de suelo al modelo SWAT, la CRI fue dividida en 58 unidades de respuesta hidrológica (“Hydrologic Response Units” - HRUs), los cuales son las unidades básicas de análisis del SWAT. Las HRUs son porciones de área que tienen combinación única de pendiente topográfica, cobertura de suelo, y tipo de suelo. Para evitar formar HRUs muy pequeñas, las HRUs con áreas menores al 10% de la sub cuenca fueron agregadas a los HRUs colindantes. Otras consideraciones en el modelo SWAT fueron: el método de número de curva para estimación de la escorrentía, el método de almacenamiento variable para el tránsito del flujo, sin drenaje agrícola. El flujo fue modelado en escala diaria en el periodo de 01/01/2016 a 12/31/2021, de los cuales dos años fueron tomados para entrenamiento del modelo, dos años para la calibración y dos años para la validación del modelo. La calibración del modelo fue efectuada con los registros de la estación de control Huancavelica.

2.3.2 Modelado de la Temperatura del agua

La temperatura del agua del río Ichu fue modelada empleando el sub modelo de temperatura del SWAT que por defecto emplea el modelo lineal de Stefan and Preud’homme (Neitsch et al., 2011; Stefan & Preud’homme, 1993) con la temperatura del aire como único predictor. Los resultados mostraron temperaturas diarias en el mismo período de calibración y validación. Sin embargo, para fines de evaluación se ha considerado el período 01/01/2020 a 04/30/2021 (rango en el que se tienen mediciones de temperatura del agua del río Ichu). La Figura 3 muestra el diagrama de flujo de la simulación de la temperatura empleando el modelo SWAT.

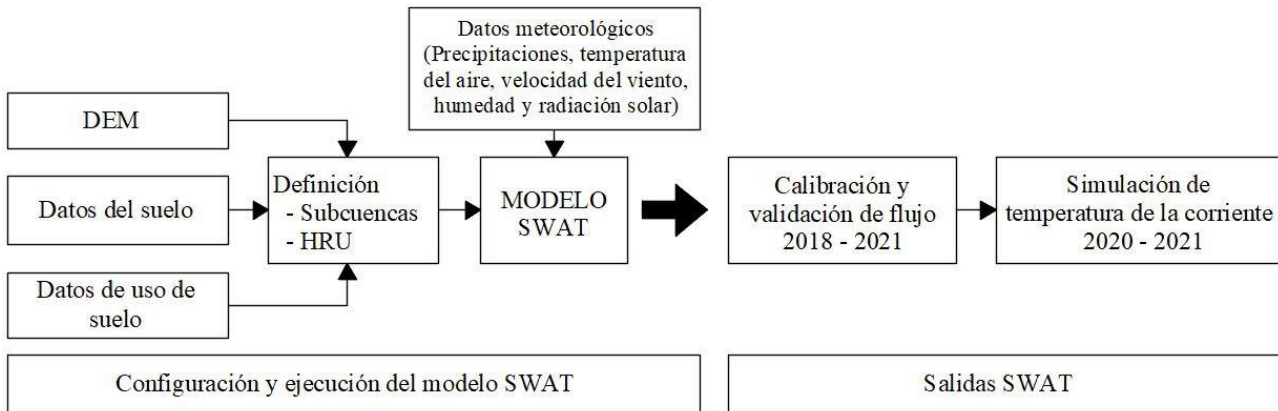


Figura 3.- Diagrama de flujo de la simulación de la temperatura del agua del río Ichu empleando el modelo SWAT.

2.4 Modelos de temperatura del agua

Los modelos de predicción de la temperatura del agua evaluados en el presente trabajo son: el modelo lineal de Stefan & Preud'homme (ecuación 1) (Stefan & Preud'homme, 1993) y el modelo logístico (no-lineal) de tres y cuatro parámetros de Mohseni & Stefan (ecuaciones 2 y 3) (Mohseni & Stefan, 1999). Estos tres modelos se caracterizan por su simplicidad y rápido ajuste.

$$T_w = 5 + 0.75T_{aire} \quad [1]$$

Donde la T_{aire} es la temperatura del aire y T_w la temperatura del agua en °C. Esta ecuación fue calibrada y usada en diversos ríos de la cuenca del río Mississippi con resultados relativamente satisfactorios en rangos moderados de temperatura del aire. Sin embargo, en regiones de temperaturas muy frías y muy cálidas, la relación temperatura del aire – agua no siguen una relación lineal, sino que toman la forma de S (Mohseni & Stefan, 1999).

$$T_w = \frac{\alpha}{1 + e^{\gamma(\beta - T_{aire})}} \quad [2]$$

$$T_w = \mu + \frac{\alpha - \mu}{1 + e^{\gamma(\beta - T_{aire})}} \quad [3]$$

Donde α es el coeficiente que determina el límite superior de la temperatura del agua, β es el coeficiente que determina el límite de inflexión de la función logística, γ es el coeficiente que representa la inclinación de la pendiente de la función, y μ es el coeficiente que representa el límite inferior de la temperatura del agua.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Calibración del modelo de flujo

La calibración del flujo a nivel diario fue efectuada con ayuda del software SWAT-CUP empleando el algoritmo “Sequential Uncertainty Fitting” (SUFI-2). Los parámetros calibrados se muestran en la Tabla S2 del material suplementario (<https://doi.org/10.5281/zenodo.6988146>). El valor de eficiencia de Nash Sutcliffe (NSE) para el modelo de flujo calibrado fue 0.61; y el porcentaje de sesgo (PBIAS) fue 7.4%. El valor de NSE es consistente con calibraciones efectuadas en otras cuencas (Arnold et al., 2012; Moriasi et al., 2007), en los cuales los valores de NSE para calibración de flujo estuvieron en el rango de 0.58 y 0.98 y los PBIAS fueron menores a 10%. La Figura S1 del material suplementario muestra el flujo observado y calibrado en la estación Huancavelica.

3.2 Simulación de la temperatura del agua

La simulación de la temperatura del agua del río Ichu empleando el modelo SWAT mostró valores por encima de las temperaturas de agua observadas. Mientras el promedio de las temperaturas observadas fue 11.27 °C, el promedio de las temperaturas simuladas fue 13.46 °C. La serie de temperaturas simuladas muestra un valor de NSE de -2.67, coeficiente de Pearson de 0.85, RMSE de 2.24, y PBIAS de 18.9. A pesar de un coeficiente de Pearson alto que indica que el modelo tiene relevancia en representar el comportamiento de la temperatura del agua observada, el modelo no es capaz de representar la media de la observada. La figura 4 muestra la simulación de la temperatura del río Ichu empleando el modelo de Stefan & Preud'homme en el modelo SWAT.

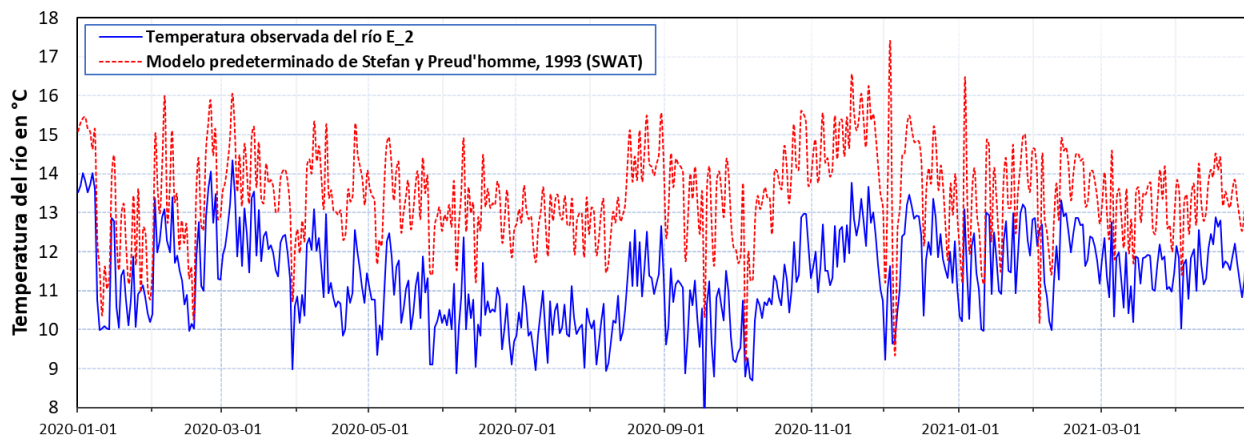


Figura 4.- Desempeño del modelo lineal de Stefan & Preud'homme del SWAT en la simulación de la temperatura del agua del río Ichu.

3.3 Ajuste del modelo de Stefan & Preud'homme para el río Ichu

El código del sub modelo de temperatura del agua del SWAT versión rev.681 (TAMU, 2021) fue modificado reemplazando los dos coeficientes fijos de la ecuación de Stefan & Preud'homme (Stefan & Preud'homme, 1993) por dos variables. Siguiendo el criterio de Latin Hypercube Sampling (Iman, 2008), se han generado 500 muestras de pares de los coeficientes de la ecuación de Stefan & Preud'homme (coeficientes a y b, eq. 4), en la vecindad de los valores predeterminados, para realizar 500 simulaciones. Las simulaciones mostraron convergencia del coeficiente a en 4.18 y del coeficiente b en 0.63. Detalles de la convergencia están disponibles como material suplementario S2 que acompañan al artículo. Con estos coeficientes, los valores de NSE, coeficiente de Pearson, RMSE y PBIAS obtenidos fueron 0.72, 0.85, 0.62 y 0.1%, respectivamente, los cuales son bastante superior a los correspondientes obtenidos empleando la ecuación predeterminada de Stefan & Preud'homme. La figura 5 muestra la temperatura del agua del río Ichu simulada con la ecuación de Stefan & Preud'homme modificada.

$$T_w = a + bT_{aire} \quad [4]$$

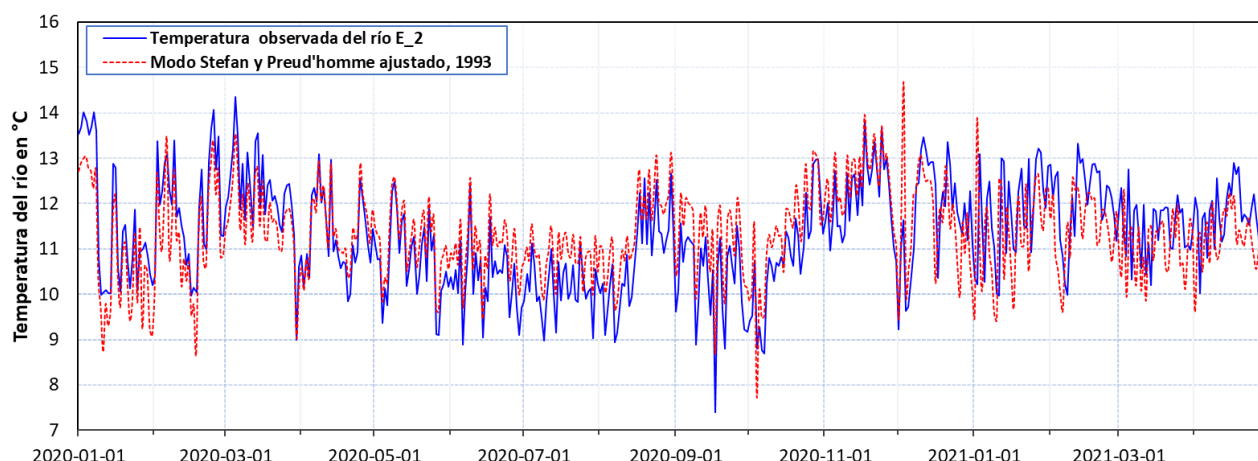


Figura 5.- Desempeño del modelo lineal ajustado de Stefan & Preud'homme en la simulación de la temperatura del agua del río Ichu.

3.4 Ajuste de modelo no lineal para el río Ichu

La simulación de la temperatura del agua del río Ichu mediante modelos no lineales involucran los modelos de Mohseni & Stefan de 3 y 4 parámetros (3P y 4P) (Mohseni & Stefan, 1999). Estos dos modelos fueron también implementados en código del sub modelo de temperatura del agua del SWAT versión rev.681 con 3 y 4 variables, respectivamente. Empleando el criterio de Latin Hypercube Sampling (Iman, 2008), se han generado 800 muestras de tres variables (α , β y γ) y 500 muestras de cuatro variables (α , β , γ y μ) para los modelos de 3P y 4P, respectivamente (coeficientes en las ecuaciones 2 y 3). En el modelo de 3P, los valores α , β y γ evaluados estuvieron en el rango de 26.0 - 35.0, 14.0 - 20.0, y 0.03 - 0.15, respectivamente. Mientras que en el modelo de 4P, los valores de α , β , γ y μ estuvieron en el rango de 26.0 - 35.0, 14.0 - 20.0, 0.03 - 0.15, y -5 - 5, respectivamente.

En el modelo de 3P, los coeficientes α , β y γ convergieron en 28.93, 16.05 y 0.093. Con estos coeficientes, los valores de NSE, coeficiente de Pearson, RMSE y PBIAS fueron 0.715, 0.85, 0.62 y 0.2, respectivamente. De forma similar, en el modelo de 4P, los coeficientes α , β , γ y μ convergieron en 30.04, 17.08, 0.097 y 0.669, respectivamente. Los valores de NSE, coeficiente de Pearson, RMSE y PBIAS obtenidos fueron 0.714 y 0.85, 0.62 y 0.3 respectivamente. Detalles de la convergencia de los parámetros del modelo 3P y 4P están disponibles como material suplementario S2 (<https://doi.org/10.5281/zenodo.6988146>). La figura 6 muestra las temperaturas del agua simuladas empleando las ecuaciones no lineales de Mohseni & Stefan ajustadas para el río Ichu.

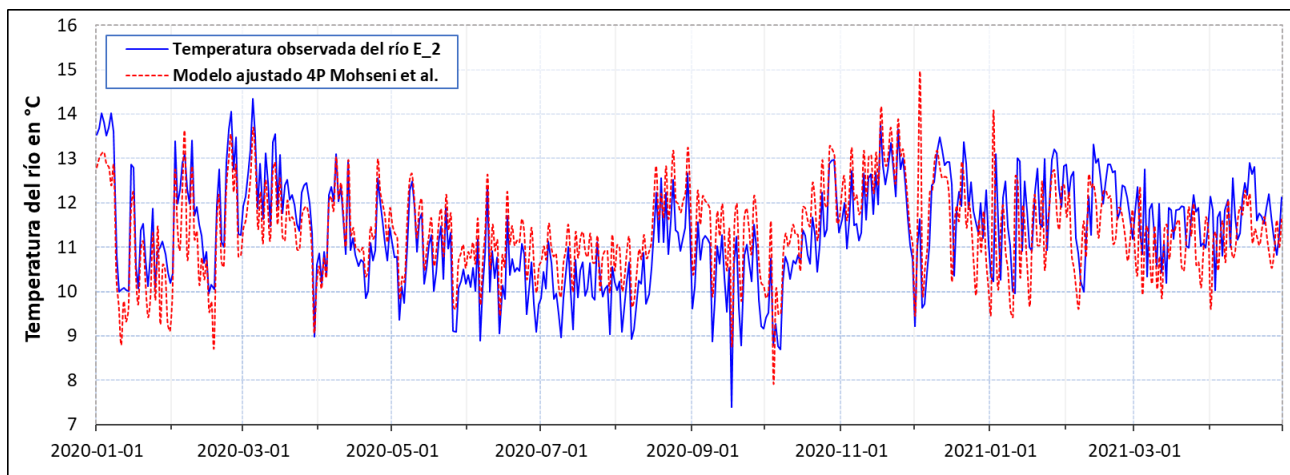
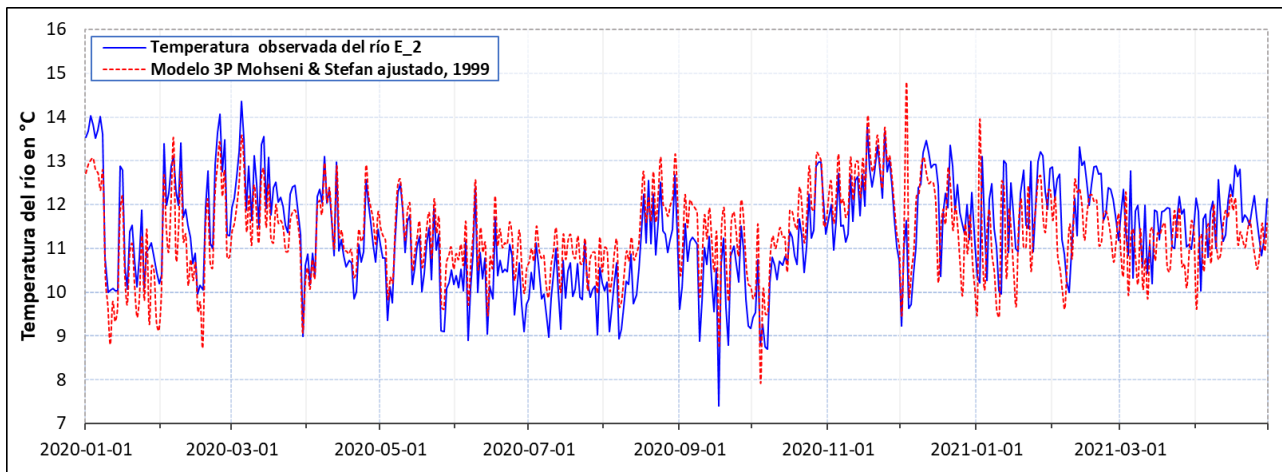


Figure 6.- Desempeño del modelo no-lineal ajustado de 3P (arriba) y 4P (abajo) en la simulación de la temperatura del agua del río Ichu.

3.5 Comparación de resultados de los modelos de temperatura del agua ajustados

La figura 7 muestra el desempeño de predicción del modelo lineal predeterminado de Stefan & Preud'homme, así como de los modelos ajustados de Stefan & Preud'homme y Mohseni & Stefan de 3 y 4 parámetros junto a los datos de temperatura observados. El registro de temperatura observada muestra el efecto de histéresis estacional entre la temperatura del aire y del agua, probablemente debido a la entrada de flujos no controlados como fuentes de agua termal y los deshielos de primavera que hacen que la temperatura del río sea más fría durante este período que a una temperatura del aire similar durante el otoño (Fellman et al., 2014).

El modelo predeterminado de Stefan & Preud'homme muestra una sobrepredicción de la temperatura del agua del río Ichu incluso por encima de la hysteresis. Por otro lado, el modelo ajustado de Stefan & Preud'homme y Mohseni & Stefan de 3 parámetros muestran un mejor desempeño de predicción ubicándose al medio de la histéresis y la nube de datos de temperatura observada. El modelo de Mohseni & Stefan de 4 parámetros muestra una ligera subestimación en la predicción en comparación a los dos anteriores, pero siempre dentro de la nube de los datos observados (Figura S2, material suplementario - <https://doi.org/10.5281/zenodo.6988146>).

En general los modelos reajustados mostraron un buen rendimiento en la predicción de la temperatura del agua del río Ichu. Sin embargo, considerando el criterio de Mallows (ecuación 5) (James et al., 2021), el cual penaliza el número de parámetros, el modelo reajustado de Stefan &

Preud'homme mostró ser el modelo más simple por incluir solo dos parámetros en la ecuación de predicción.

$$C_p = \frac{1}{n} (RSS + 2d\sigma^2) \quad [5]$$

Donde RSS es la suma de residuos cuadrados, d es la cantidad de parámetros del modelo, σ^2 es el estimado de la varianza empleando todos los predictores, y n es el número de observaciones. Los coeficientes de Mallows obtenidos para los modelos de Stefan & Preud'homme y Mohseni & Stefan 3P y 4P fueron 0.39, 0.40 y 0.42, respectivamente.

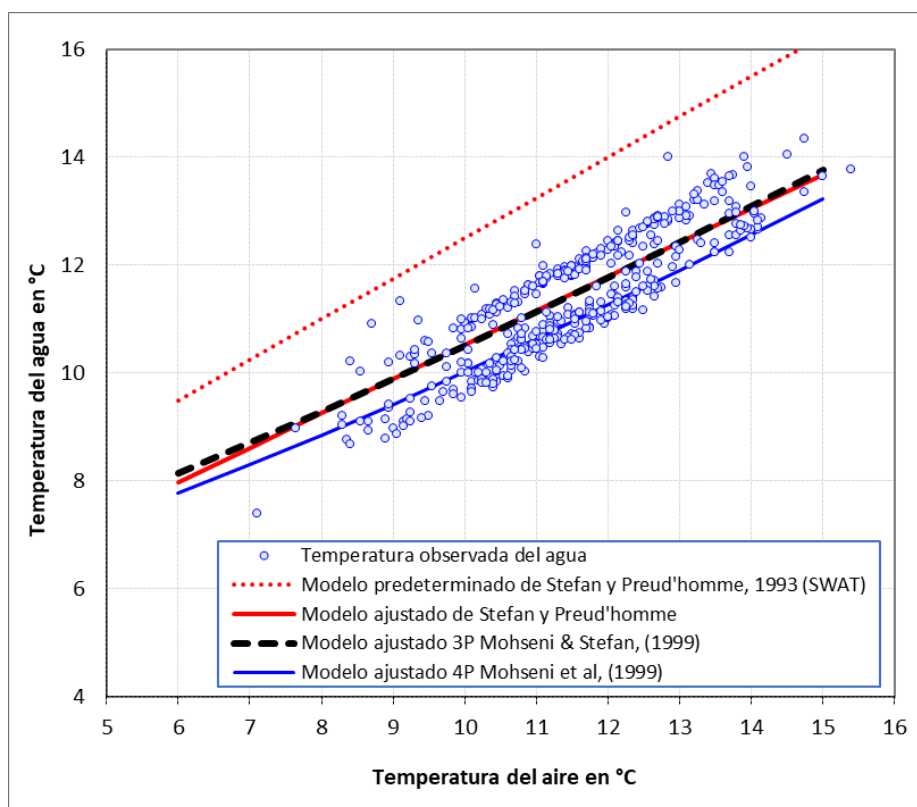


Figura 7.- Predicción de la temperatura del agua del río Ichu empleando el modelo predeterminado y ajustado de Stefan & Preud'homme y el modelo de Mohseni & Stefan de 3p y 4P.

4. CONCLUSIONES

El presente trabajo presenta una evaluación y reajuste de los principales modelos estadísticos de predicción de la temperatura del agua, aplicados en la CERI de los andes peruanos. Se revisaron en modelo lineal de Stefan & Preud'homme que por defecto es empleado en el SWAT y los modelos no-lineales de Mohseni & Stefan de 3 y 4 parámetros. Las modificaciones de los modelos estadísticos fueron configuradas en el código del SWAT y reajustadas empleando la técnica de Latin Hypercube Sampling.

Los hallazgos mostraron que el modelo lineal predeterminado de Stefan & Preud'homme sobreestima la temperatura del río en esta parte de los andes peruanos, a pesar de mostrar una buena representación de la variabilidad. Por tanto, este trabajo sugiere reajustar los parámetros (coeficientes) del modelo lineal al menos para el río Ichu. El modelo reajustado de Stefan & Preud'homme mostró una relevante representación tanto de la media como del comportamiento (variabilidad) de la temperatura del agua del río Ichu. Los modelos no-lineales de Mohseni & Stefan de 3P y 4P ajustados al río Ichu también mostraron una relevante representación de la media y la variabilidad de la temperatura del agua. Los niveles de precisión en la predicción de la temperatura del agua, empleando

los tres modelos ajustados para el río Ichu, mostraron ser muy competentes. Sin embargo, el modelo ajustado de Stefan & Preud'homme mostró ser el modelo más simple de predicción debido a la menor cantidad de parámetros.

A pesar de que los modelos estadísticos lineales y no-lineales han sido bien estudiados en diversos ríos del mundo, estos no han sido verificados en los ríos de los andes sudamericanos. En esta línea, este estudio contribuye en la comprensión de la relación de la temperatura del aire y del agua del río Ichu en los andes peruanos. Sin embargo, los hallazgos de este estudio están limitados a los rangos de temperatura del aire y del agua empleados aquí, así como, a las características del río Ichu. Futuras investigaciones deben continuar explorando mayores rangos de temperatura para elaborar un amplio y general entendimiento de la relación temperatura agua-aire en los andes sudamericanos. Dentro de esta región, también se sugiere evaluar otros modelos de predicción de temperatura del agua empleando más variables de predicción a fin de mejorar la precisión. Finalmente, se recomienda también continuar y ampliar el monitoreo de la temperatura del agua en diversos ríos de los andes sudamericanos, los cuales son vulnerables al cambio climático.

AGRADECIMIENTO

Este estudio fue posible gracias a la escuela profesional de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Huancavelica, Perú y al laboratorio de hidráulica. También queremos agradecer al Dr. Francisco J. Guerrero cuyas recomendaciones ayudaron a mejorar los objetivos del estudio.

MATERIAL SUPLEMENTARIO

La data, tablas y figuras suplementarias está libremente disponible como: Efrain Noa-Yarasca, & Ivan A. Ayala Bizarro. (2022, August 13). Tablas, figuras y data de Evaluación y Predicción de la Temperatura del Agua en un río en los Andes Peruanos - XXX Congreso Latinoamericano de Hidráulica 2022, Foz de Iguazú. <https://doi.org/10.5281/zenodo.6988146>.

REFERENCIAS

- Arnold, J. G., Moriasi, D. N., Gassman, P. W., Abbaspour, K. C., White, M. J., Srinivasan, R., Santhi, C., Harmel, R. D., Van Griensven, A., Van Liew, M. W., Kannan, N., & Jha, M. K. (2012). "SWAT: Model use, calibration, and validation". *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 55(4), 1491–1508.
- Ayala, I., Zubiaur, M., & Mendoza, J. (2018). "Prediction of drought with artificial neural networks and genetic algorithms using precipitation by remote perception". *Journal of Environmental Science & Engineering*, July 2018.
- Boyd, M., & Kasper, B. (2003). *Analytical Methods for Dynamic Open Channel Heat and Mass Transfer: Methodology for the Heat Source Model Version 7.0*.
- Deinet, S., Scott-Gatty, K., Rotton, H., Twardek, W. M., Marconi, V., McRae, L., Baumgartner, L. J., Brink, K., Claussen, J. E., Cooke, S. J., Darwall, W., Eriksson, B. K., Garcia de Leaniz, C., Hogan, Z., Royte, J., Silva, L. G. M., Thieme, M. L., & Tickne, O. L. F. (2020). "The Living Planet Index for Migratory Freshwater Fish - Technical Report". *Science Into Policy*, 131–149.
- Fellman, J. B., Nagorski, S., Pyare, S., Vermilyea, A. W., Scott, D., & Hood, E. (2014). "Stream temperature response to variable glacier coverage in coastal watersheds of Southeast Alaska". *Hydrological Processes*, 28(4), 2062–2073. <https://doi.org/10.1002/hyp.9742>
- Fischer, G., Nachtergaele, F., Prieler, S., Velthuisen, V. H. T., Verelst, L., & Wiberg, D. (2008). *Global Agro-ecological Zones Assessment for Agriculture (GAEZ 2008)*.
- Fondriest Environmental Inc. (2014). "Water Temperature." *Fundamentals of Environmental*

Measurements.

- Garreaud, R. D.** (2009). "The Andes climate and weather". *Advances in Geosciences*, 22, 3–11.
<https://doi.org/10.5194/adgeo-22-3-2009>
- Iman, R. L.** (2008). "Latin Hypercube Sampling". *Encyclopedia of Quantitative Risk Analysis and Assessment, January 1999*. <https://doi.org/10.1002/9780470061596.risk0299>
- Isaak, D. J., Luce, C. H., Horan, D. L., Chandler, G. L., Wollrab, S. P., & Nagel, D. E.** (2018). "Global Warming of Salmon and Trout Rivers in the Northwestern U.S.: Road to Ruin or Path Through Purgatory". *Transactions of the American Fisheries Society*, 147(3), 566–587.
- James, G., Witten, D., Hastie, T., & Tibshirani, R.** (2021). *An introduction to statistical learning. In Springer (Ed.), Springer texts (Second Edi, Vol. 102)*. Springer Publishing.
- Kaushal, S. S., Likens, G. E., Jaworski, N. A., Pace, M. L., Sides, A. M., Seekell, D., Belt, K. T., Secor, D. H., & Wingate, R. L.** (2010). "Rising stream and river temperatures in the United States". *Frontiers in Ecology and the Environment*, 8(9), 461–466.
- Magrin, G. O., Marengo, J. A., Boulanger, J.-P., Buckeridge, M. S., Castellanos, E., Poveda, G., Scarano, F. R., & Vicuña, S.** (2014). "Central and South America. In: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability". In *Transcultural Psychiatry*.
- Mohseni, O., Erickson, T. R., & Stefan, H. G.** (1999). Sensitivity of stream temperatures in the "United States to air temperatures projected under a global warming scenario". *Water Resources Research*, 35(12), 3723–3733. <https://doi.org/10.1029/1999WR900193>
- Mohseni, O., & Stefan, H. G.** (1999). "Stream temperature/air temperature relationship: A physical interpretation". *Journal of Hydrology*, 218(3–4), 128–141.
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Binger, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L.** (2007). "Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations". *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 50(3), 885–900.
- Neitsch, S., Arnold, J., Kiniry, J., & Williams, J.** (2011). "Soil & Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2009". *Texas Water Resources Institute*, 1–647.
- Noa-Yarasca, E., Babbar-Sebens, M., & Jordan, C.** (2021a). *A machine learning model of riparian vegetation attenuated stream temperatures*.
<https://ir.library.oregonstate.edu/downloads/0r967b65c#page=137>
- Noa-Yarasca, E., Babbar-Sebens, M., & Jordan, C.** (2021b). *Including Riparian Vegetation in hydroclimatological stream temperature model*.
<https://ir.library.oregonstate.edu/downloads/0r967b65c#page=137>.
- Samuels, R., Hochman, A., Baharad, A., Givati, A., Levi, Y., Yosef, Y., Saaroni, H., Ziv, B., Harpaz, T., & Alpert, P.** (2018). "Evaluation and projection of extreme precipitation indices in the Eastern Mediterranean based on CMIP5 multi-model ensemble". *International Journal of Climatology*, 38(5), 2280–2297. <https://doi.org/10.1002/joc.5334>
- Stefan, H. G., & Preud'homme, E. B.** (1993). "Stream Temperature Estimation From Air Temperature". *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 29(1), 27–45.
- TAMU.** (2021). *SWAT: Soil & Water Assessment Tool*. Texas A&M University.
<https://swat.tamu.edu/>
- Van Vliet, M. T. H., Franssen, W. H. P., Yearsley, J. R., Ludwig, F., Haddeland, I., Lettenmaier, D. P., & Kabat, P.** (2013). "Global river discharge and water temperature under climate change". *Global Environmental Change*, 23(2), 450–464.
- Wehrly, K. E., Brenden, T. O., & Wang, L.** (2009). "A comparison of statistical approaches for predicting stream temperatures across heterogeneous landscapes". *Journal of the American Water Resources Association*, 45(4), 986–997.