



Organización  
de las Naciones Unidas  
para la Educación,  
la Ciencia y la Cultura



Programa  
Hidrológico  
Intergubernamental

Aqua-LAC

Revista del Programa Hidrológico Intergubernamental  
para América Latina y el Caribe

## Avances en el pronóstico operacional de corto plazo y la evolución futura de largo plazo del fenómeno de la turbiedad en el río Maipo

*Advances in the short-term operational forecast and the long-term future evolution of the turbidity phenomenon in the Maipo River*

Carlos Poblete <sup>1\*</sup>, Francisco Suárez <sup>2</sup>, Sebastián Vicuña <sup>3</sup>, Carolina Meruane <sup>4</sup>  
Alberto de La Fuente <sup>5</sup>, Jorge Reyes A <sup>6</sup>

Recibido: 07/04/2020

Aceptado: 04/08/2020

\*Autor de correspondencia

### Resumen

El fenómeno de la turbiedad extrema ha sido abordado en trabajos previos a través del análisis de eventos históricos, estudios que han permitido, además de caracterizar y comprender de mejor forma el fenómeno, estar en condiciones de intentar una predicción del mismo. Se presentan a continuación avances conseguidos en dos líneas de predicción: 1) pronósticos operacionales de corto plazo, alimentados por forzantes que gatillan aumentos de turbiedad en el río y 2) evolución futura de largo plazo, considerando los patrones de cambio climáticos que pueden ocurrir sobre la cuenca del Maipo. El modelo operacional pronostica la serie de tiempo horaria de turbiedad para un horizonte de 3 días y consiste en un modelo híbrido que combina información geomorfológica y meteorológica de la cuenca, unida a un pronóstico hidrometeorológico base, con algoritmos Deep Learning que definen el peso de cada forzante. Desde su puesta en operación, la herramienta se ha utilizado para generar advertencias del tipo alerta temprana y estimaciones del tiempo de duración de la emergencia. La evolución futura del fenómeno se abordó utilizando simulaciones de un modelo climático de alta resolución las cuales alimentaron un modelo hidrológico local, resultados que unidos a un modelo basado en redes neuronales, generaron series diarias de turbiedad. Respecto de la situación actual y bajo un escenario de Cambio Climático RCP 8.5, se esperarían para el futuro incrementos en el número de eventos, en la duración máxima y magnitud media asociada y aparentes reducciones en las intensidades máximas de los mismos. Si bien ambas herramientas deben seguir siendo evaluadas, se consideran interesantes alternativas para avanzar en la predicción del comportamiento del fenómeno, tanto en el corto como en el largo plazo.

**Palabras clave:** turbiedad, predicción, pronóstico meteorológico, simulación climática, modelación, redes neuronales

### Abstract

*The phenomenon of extreme turbidity has been addressed in previous works through the analysis of historical events, studies that have allowed, in addition to better characterize and understand the phenomenon, to be able to try to predict it. Advances achieved in two lines of prediction are presented below: 1) short-term operational forecasts, fed by forcings that trigger turbidity increases in the river, and 2) long-term future evolution, considering the climatic change patterns that may occur in the Maipo basin. The operational model forecasts the hourly time series of turbidity for a 3-day horizon and consists of a hybrid model that combines geomorphological and meteorological information of the basin, coupled with a base hydrometeorological forecast, with Deep Learning algorithms that define the weight of each forcing. Since its implementation, the tool has been used to generate early warning warnings and estimates of the duration of the emergency. The future evolution of the phenomenon was addressed using simulations of a high-resolution climate model which fed a local hydrological model, results which, together with a model based on neural networks, generated daily turbidity series. With respect to the current situation and under an RCP 8.5 Climate Change scenario, increases in the number of events, in the maximum duration and associated average magnitude, and apparent reductions in the maximum intensities of these events are expected in the future. Although both tools should continue to be evaluated, they are considered interesting alternatives to advance in the prediction of the behavior of the phenomenon, both in the short and long term.*

**Keywords:** turbidity, prediction, weather forecasting, climate simulation, modeling, neural networks.

1 Subgerencia de Planificación Técnica y Recursos Hídricos, Aguas Andinas, Chile. cpoblete@aguasandinas.cl

2 Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental UC, Chile. fsuarez@ing.puc.cl

3 Centro de Cambio Global UC, Chile. svicuna@ing.puc.cl

4 Modelación Ambiental SpA, Chile. cmeruane@modelacion.cl

5 Departamento de Ingeniería Civil, U. de Chile, Chile. aldelaflu@ing.uchile.cl

6 Aguas Andinas, Chile. jreyesa@aguasandinas.cl

## 1. INTRODUCCIÓN

Trabajos previos han ayudado a comprender el fenómeno de turbiedad en la cuenca del río Maipo a través del análisis de eventos históricos, sin embargo, es de interés avanzar hacia la posibilidad de una predicción de su comportamiento, tanto en el corto como en el largo plazo. El presente documento tiene como objetivo presentar los avances conseguidos hasta el momento en ambas líneas, mostrando los logros en cuanto a: 1) pronósticos operacionales de corto plazo alimentados por forzantes que gatillan aumentos de turbiedad en el río y donde la actualización continua es clave y 2) evolución futura de largo plazo, considerando los patrones de cambio climáticos que pueden ocurrir sobre la cuenca del Maipo en base a simulaciones climáticas globales. Las aguas del río Maipo se caracterizan por presentar una calidad que las hace adecuadas para la producción de agua potable mediante tecnologías de tratamiento convencionales. No obstante, en ocasiones la disponibilidad natural se ve afectada por eventos de crecidas con altas concentraciones de sedimentos en suspensión, alcanzando niveles de turbiedad que no permiten su tratamiento, representando un factor de vulnerabilidad para el sistema de producción de Aguas Andinas. Durante los últimos 10 años, se han conseguido importantes avances en la comprensión del fenómeno de turbiedades extremas. Dentro de lo anterior, destacan las mejoras conseguidas en su caracterización y cuantificación, el aumento observado en su ocurrencia y la modelación matemática de su recurrencia, lo que ha permitido poder estimar periodos de retorno según duración y umbral del episodio, así como dimensionar las obras necesarias para dotar a la compañía de la autonomía solicitada por la Autoridad. Junto a lo anterior, se ha intentado estudiar alguna relación de causalidad del fenómeno con la hidrometeorología de la cuenca con el objetivo de poder predecirlo. En principio parece evidente una relación de la turbiedad con el caudal del río, sin embargo, turbiedades entre 3.000 y 4.000 UNT (Valores límite sobre los cuales la producción de las plantas de tratamiento no puede ser 100%) se ha visto que ocurren en prácticamente todo el espectro de caudales, demostrando la no linealidad del fenómeno con las variables usuales. No obstante, en términos descriptivos, se han detectado 3 condiciones climatológicas que favorecen la ocurrencia de fenómenos de alza de turbiedades: Deshielos de verano, Precipitaciones convectivas y Precipitaciones

frontales con isoterma alta, aunque las relaciones no son lineales ni tampoco estrictas, lo que dificulta enormemente su pronóstico, materia aún pendiente y que aborda el presente documento.

El objetivo de este trabajo fue desarrollar una herramienta simple y robusta para el manejo y gestión en tiempo real de las operaciones de las plantas de agua potable, generando advertencias del tipo alerta temprana como también estimaciones del tiempo de duración de la emergencia.

## 2. METODOLOGÍA

Se desarrolló un modelo para el pronóstico horario de la serie de tiempo de turbiedad del agua en la captación Toma Independiente, para un horizonte de 3 días. Se trata de un modelo híbrido con actualización horaria que combina un modelo conceptual asociado a las forzantes que gatillan aumentos de turbiedad en el río, con algoritmos Deep Learning que definen el peso de cada forzante.

Para configurar las variables de entrada, se desarrollaron las siguientes actividades:

- Caracterización geomorfológica de la cuenca.
- Recopilación de información histórica horaria de turbiedades y caudales.
- Generación de eventos históricos, entendida como el conjunto de datos de entrada al modelo (precipitación, línea de nieve, etc.) y su respuesta (caudal y turbiedad horaria).
- Calibración, validación y testeo.

La configuración final para las variables de entrada consideró los datos de los 3 días anteriores y los 3 días futuros de las siguientes variables:

- Altura de la isoterma cero.
- Área aportante pluvial, tiempo de concentración.
- Precipitación total y convectiva y humedad relativa.
- Temperatura en la tropósfera, específicamente a 3.500 msnm.

Finalmente, también se requiere de la última medición turbiedad como condición adicional. La figura 1 siguiente muestra un esquema simplificado del funcionamiento. La metodología propuesta consistió en 4 etapas sucesivas de validación, calibración e implementación de modelos, según muestra la figura 2 y la descripción siguiente:

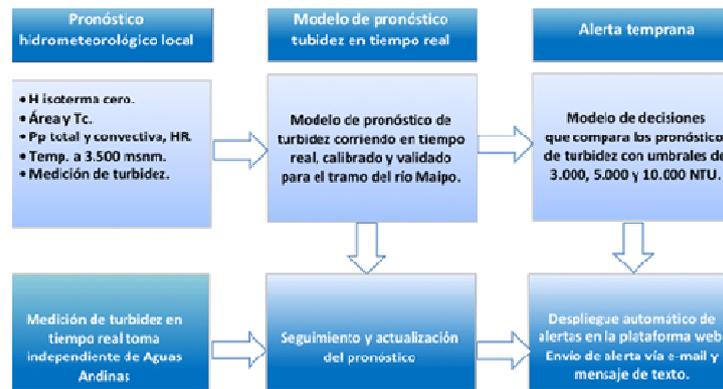


Figura 1. Esquema de funcionamiento del módulo de pronóstico operacional de turbiedad

- Modelo de turbiedad: ocupando datos hidroclimatológicos observados (caudales, precipitación y temperatura) y de turbiedad observada diaria, se calibró y validó un Modelo de predicción para simular las turbiedades históricas (flechas naranjas) buscando ser capaz de representar las características de la serie temporal, para así poder caracterizar los eventos en función de su umbral y duración.
- Modelos atmosférico e hidrológico: ocupando datos hidroclimatológicos observados (caudales, precipitación y temperatura) se realizaron dos actividades (flechas blancas): 1) validación de las series climáticas generadas por el Modelo atmosférico y 2) calibración y validación de los caudales históricos del Modelo hidrológico.
- Simulación de turbiedad: Se realizó un procedimiento de validación de caudales y turbiedades históricas, pero considerando como únicas forzantes las series climáticas generadas por el Modelo atmosférico (flechas azules). Con

las series climatológicas del Modelo atmosférico se obtienen series de caudales del Modelo hidrológico que se validan con los datos históricos. Para terminar esta etapa, se ingresan las series hidroclimatológicas simuladas anteriores en el modelo de predicción de turbiedad para validar sus resultados en base a (1) los datos históricos y (2) los datos sintéticos de turbiedad entregados por el modelo en base a datos históricos (actividad a)). Esta validación está centrada en un análisis de frecuencia e intensidad de los eventos de turbiedad.

- Escenarios futuros: Luego de haber calibrado los 3 modelos (atmosférico, hidrológico y de turbiedad), se hicieron proyecciones de series hidroclimáticas para obtener caudales y turbiedades futuras asociadas a escenarios de Cambio Climático (flechas verdes). En base a estos resultados se estudian las ocurrencias de los eventos de turbiedad y su variación con respecto al periodo histórico.

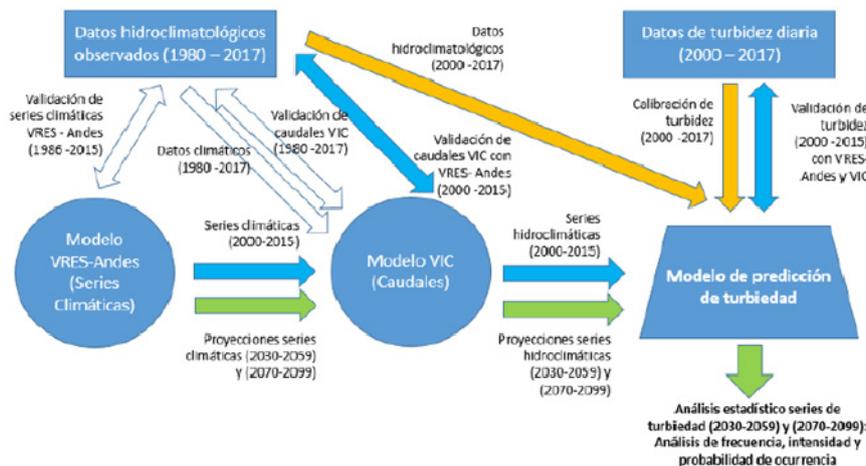


Figura 2. Metodología para la generación de series futuras de turbiedad

### 3. RESULTADOS

Diversas métricas mostraron en general un buen ajuste del modelo durante la etapa de calibración, en particular de los eventos de turbiedad extrema, tanto en sus valores promedios y máximos como en sus duraciones. La figura 3 muestra las comparaciones de turbiedad máxima pronosticada y desviación estándar de la turbiedad horaria para los próximos 3 días. Es importante destacar que el pronóstico de la duración del evento es en ocasiones incluso más importante que el valor máximo alcanzado, pues una vez declarado el evento y eventualmente cerrada la captación, es fundamental estimar cuándo la turbiedad volverá a sus valores usuales y permitirá retomar la captación normal desde el río nuevamente. Las figuras 4 y 5 también muestran un buen ajuste en cuanto a este parámetro. Desde su puesta en marcha, el modelo de pronóstico acumula 9 meses de

operación (oct/18 a jun/19). Respecto del periodo de calibración inicial, cuyo ajuste se realizó con reanálisis meteorológico, durante el periodo de operación se ha observado una baja en el desempeño (ver Figura 6), atribuida principalmente al error asociado en el pronóstico meteorológico a 3 días. No obstante, en general los errores siguen siendo bajos. Para todo el periodo de operación, se obtienen errores cuadráticos medios (RMS) normalizados por el promedio máximo de 12.4% y medio de 10.0%. Existe la intención de revisar el modelo al menos en forma anual, incorporando toda la información generada de la comparación entre las series de turbiedades observadas y las pronosticas, para decidir si es necesario algún ajuste de sus parámetros para mejorar su desempeño.

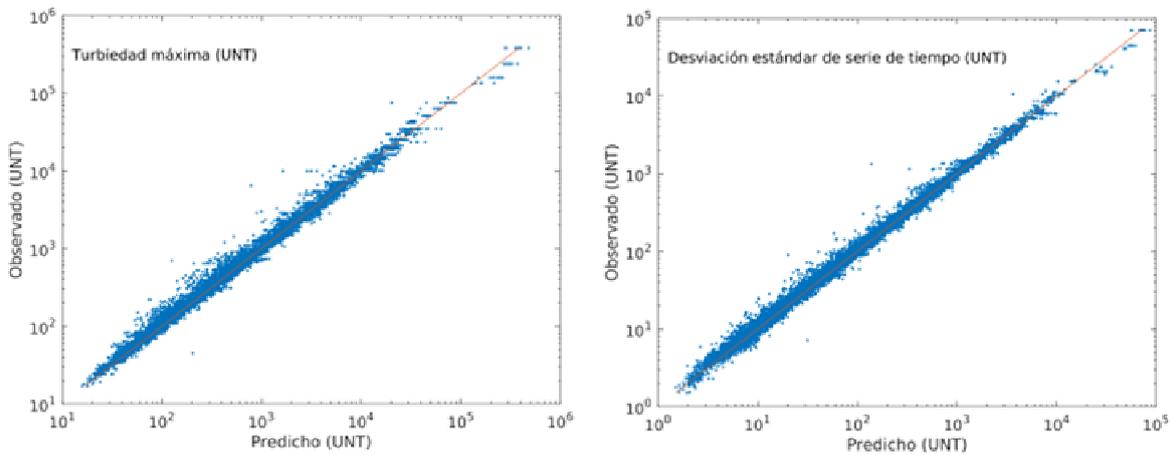


Figura 3. Comparación entre valores pronosticados (eje x) y observados (eje y). Turbiedad máxima (izq) y desviación estándar (der) para los próximos 3 días.

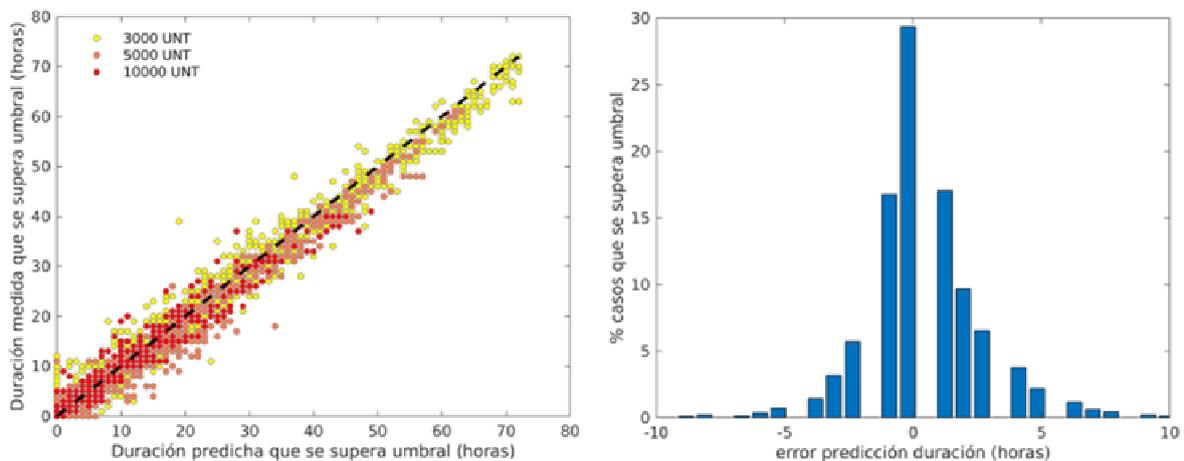


Figura 4. Comparación entre valores pronosticados (eje x) y observados (eje y) para la duración de eventos que superan umbrales (izq). Histograma del error en el pronóstico de la duración de eventos que superan umbrales (der).

Es importante mencionar que los modelos de inteligencia artificial no permiten explicar en profundidad los mecanismos físicos involucrados en los procesos de escorrentía y calidad de aguas de los ríos. Sin embargo, en el contexto de un sistema de alerta temprana, en donde lo que se busca es dar una advertencia precisa para eventos extremos, se da mayor importancia a la simplicidad y robustez del

modelo de pronóstico, que a la descripción precisa de los diferentes subprocesos internos que explican el evento. En este estudio se buscó evaluar una metodología para la caracterización y predicción de los eventos futuros de turbiedad, tomando en cuenta los patrones de cambio climático que pueden ocurrir sobre la cuenca del Maipo.

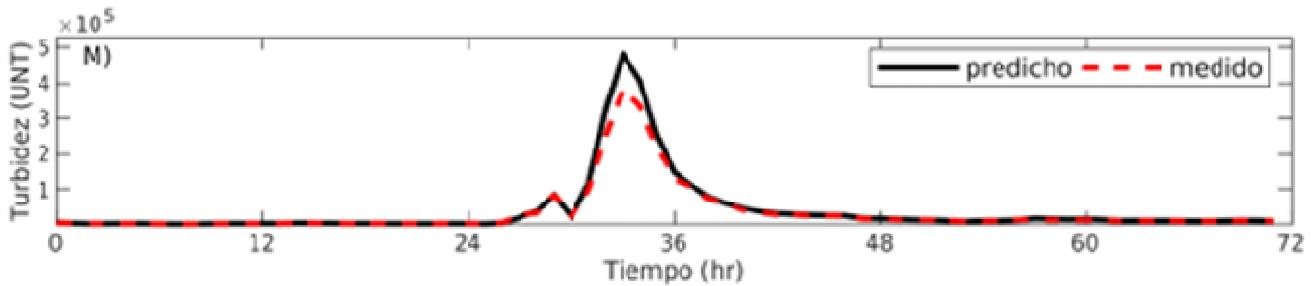


Figura 5. Serie de tiempo de comparación de turbiedad horaria observada y pronosticada para evento extremo

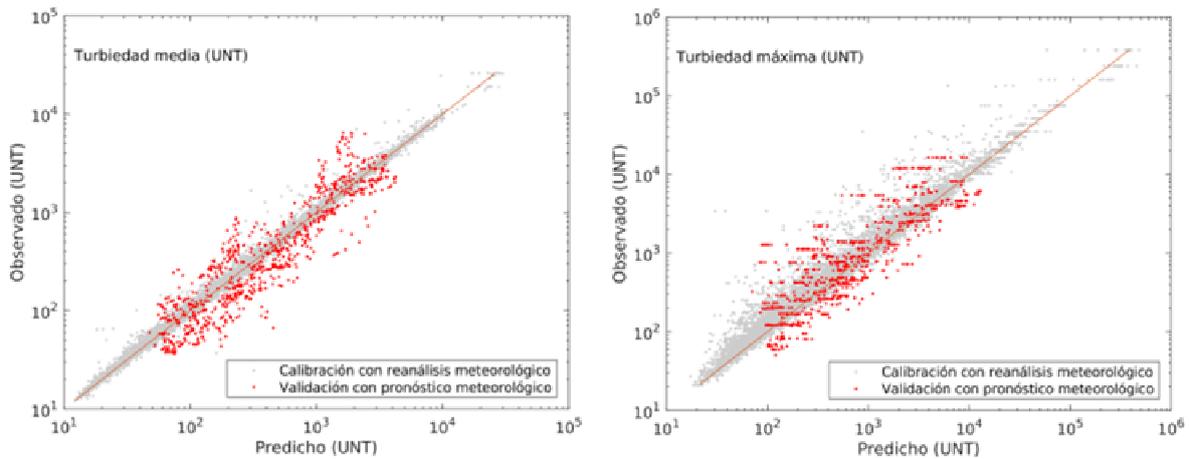


Figura 6. Comparación del pronóstico de turbiedad media (izq) y máxima (der) para los próximos 3 días y los datos medidos desde la puesta en marcha de la plataforma (puntos rojos). Como referencia se muestran en gris el pronóstico de la calibración.

### 3.1 Validación Histórica

A continuación, se muestran los resultados del proceso de validación de los modelos utilizados, comparando sus resultados con los valores históricos observados. Esto equivale a las actividades a), b) y c) descritas en el punto 4.1 y figura 6 anteriores (flechas naranjas, blancas y azules).

### 3.2 Modelo Climático

Para este estudio se tuvo acceso al proyecto VRES-Andes (Centro de Cambio Global en conjunto con el Lawrence Berkeley National Laboratory, el National Center for Atmospheric Research (NCAR), el Massachusetts Institute of Technology, y la Universidad de California Davis) el cual realizó una

modelación de alta resolución (~14 Km) en la región de los Andes Sudamericanos.

El modelo climático VRES-Andes simuló correctamente los patrones de precipitación y temperatura, aunque debió ser corregido mediante una técnica estadística de post-procesamiento para la

remoción de sesgo con objeto de representar las condiciones del clima local (ver figura 7). El análisis de los resultados permitió concluir que el modelo climático VRES-Andes es una herramienta válida para la modelación de las condiciones de clima futuro.

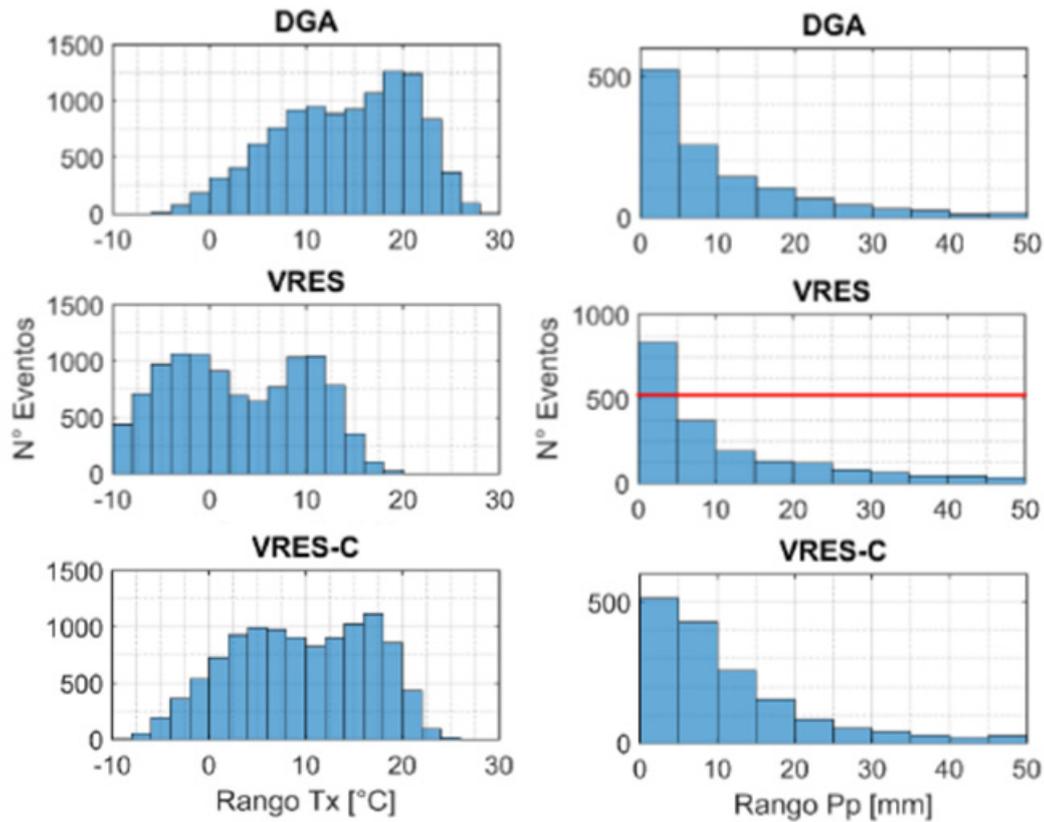


Figura 7. Comparación de histogramas base de temperatura máxima (izq) y precipitación anual (der) entre las observaciones DGA y las simulaciones del modelo VRES-Andes (VRES) y VRES-Andes corregido (VRES-C)

### 3.3 Modelo Hidrológico

La modelación hidrológica se realizó mediante el modelo hidrológico “Variable Infiltration Capacity” (VIC). Se trata de un modelo distribuido de base física que representa procesos de evapotranspiración, interceptación, infiltración, acumulación y derretimiento de nieve, etc.

El modelo VIC se ha implementado y calibrado en la totalidad de la cuenca del Río Maipo como parte del trabajo de actualización del Balance Hidrológico

(DGA, 2017). Debido a que el presente estudio considera solamente la cuenca alta del Maipo, se calibró sólo la estación fluviométrica DGA Río Maipo en El Manzano.

Al correr el modelo VIC con las forzantes VRES-Andes corregidas según la remoción de sesgo, se logran captar las propiedades básicas del régimen hidrológico nival del río, aunque de igual forma se observan sesgos que pueden removerse estadísticamente, como muestra la figura 8 siguiente.

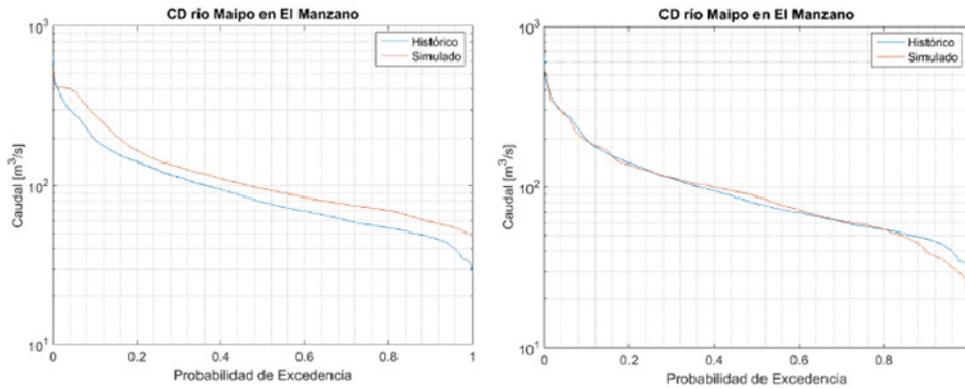


Figura 8. Curva de duración de caudales del río Maipo en El Manzano con forzantes VRES-Andes sin remoción de sesgo (izq) y con remoción de sesgo (der)

### 3.4 Modelo De Turbiedad

El registro temporal de turbiedad se analiza en base a una teoría de sucesiones, es decir, la serie se define como un registro temporal que comparte la característica de superar un cierto umbral. En base a este umbral, los eventos se pueden caracterizar en duración, intensidad máxima y magnitud, como se señala en la figura 9. El análisis realizado considera una escala diaria, tanto en sus datos de entrada como en sus resultados. Para la predicción de turbiedad en el río Maipo se ocupó un esquema tipo Autoregresivo No-lineal con input externos (NARX), dada la habilidad que poseen las redes neuronales para resolver problemas no-lineales sin tener la necesidad de comprender e identificar todos los procesos físicos involucrados. Para caracterizar los eventos que entrega el modelo de turbiedad, se comparan estadísticamente los resultados con los datos observados, ya que el modelo no tiene como finalidad predecir a escala diaria, sino más bien ser capaz de reproducir los comportamientos generales a escalas temporales mayores.

Estas comparaciones son:

- Identificación del número total de eventos sobre el umbral.
- Comparación de las duraciones, intensidad máxima y magnitud: se considera el total de los eventos simulados, por lo que se obtiene un valor mínimo, medio y máximo para cada una de las tres propiedades antes mencionada.
- Identificación de los valores máximos de intensidad mensuales.

Se observó una satisfactoria representación del comportamiento de turbiedad al evaluar el desempeño del modelo con forzantes históricas (DGA), no obstante, al evaluar el desempeño con forzantes VRES, se observó un considerable aumento en la duración de los eventos de turbiedad, probablemente debido a un “overfitting” de la red neuronal, lo que causa que en la serie temporal se quede fija en un valor relativamente constante.

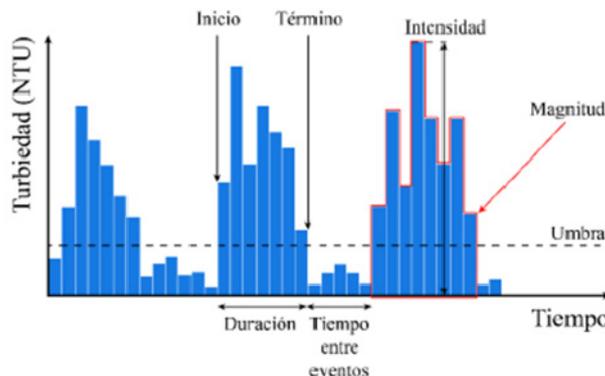


Figura 9. Esquema gráfico de las propiedades de los eventos de turbiedad

Tabla 1. Resultados para turbiedad simulados con base histórica DGA y forzantes VRES-Andes, para el periodo 2001-2015

Registro / Forzantes <sup>1</sup>	Eventos turbiedad	Duración [días]			Intensidad Máxima [NTU]			Magnitud [NTUxdía]		
		Mínimo	Mediana	Máximo	Mínimo	Mediana	Máximo	Mínimo	Mediana	Máximo
OBS	45	1	1	14	3.090	4.952	78.172	3.090	7.236	104.816
DGA	27	1	1	15	3.045	4.837	22.580	3.045	10.511	97.770
VRES	29	1	2	44	4.053	4.605	33.340	4.053	10.676	822.981

1OBS: Periodo histórico registrado de eventos de turbiedad. DGA: Eventos de turbiedad simulados en base a registros históricos DGA. VRES: Eventos de turbiedad simulados en base al modelo atmosférico VRES y el modelo VIC.

### 3.5 Escenarios Futuros

#### 3.5.1 Clima

En primer lugar se analizó el cambio en las variables meteorológicas de temperatura y precipitación para dos periodos futuros: uno cercano, correspondiente a los años 2030-2059, y un período futuro lejano, correspondiente a los años 2070-2099. Para esto, se aplicó un proceso de corrección de sesgo sobre los datos históricos que ya fue explicado anteriormente, para luego corregir los datos futuros de tal forma que posean la misma varianza y diferencia con respecto a los datos históricos originales. Al comparar el periodo histórico (1986-2015) con el futuro (2070-2099) bajo escenario de Cambio Climático RCP 8.5 (Figura 10), se observa para la cuenca Maipo Alto un aumento en las temperaturas máxima (+4.8 °C) y mínima (+4.9 °C) y una disminución leve de la precipitación (-0.6 mm). Considerando que estas dos variables influyen considerablemente el patrón de caudales y de turbiedad, estos resultados apuntan en la dirección de que en el cambio climático debiese afectar de manera importante los eventos de turbiedad.

#### 3.5.2 Hidrología

Respecto de la hidrología, se observa una disminución acentuada en la escorrentía promedio estival (-44.4 m<sup>3</sup>/s) acompañada de un aumento del caudal invernal (+16.4 m<sup>3</sup>/s), la que no alcanza para compensar, provocando una disminución en la escorrentía promedio total anual de -19% equivalente a -22.3 m<sup>3</sup>/s (figura 11).

#### 3.5.3 Turbiedad

Se simularon las series de turbiedad futuras en base a las forzantes meteorológicas (VRES-Andes), como también los caudales obtenidos a partir de estas mismas (VIC). Es preciso recalcar que todas estas series poseen una remoción de sesgo mediante los procedimientos señalados en los puntos anteriores. Se analizaron las propiedades esperadas para los eventos de turbiedad futuros. Respecto de la actualidad, se esperarían incrementos en el número de eventos, en la duración máxima y magnitud media asociada y aparentes reducciones en las intensidades máximas de los mismos.

Tabla 2. Resultados para turbiedad para periodos históricos y futuro

Registro / Forzantes	Eventos turbiedad	Duración [días]			Intensidad Máxima [NTU]			Magnitud [NTUxdía]		
		Mínimo	Mediana	Máximo	Mínimo	Mediana	Máximo	Mínimo	Mediana	Máximo
VRES Historico <sup>1</sup>	31	1	2	44	3.035	4.981	78.172	3.007	7.236	822.981
VRES 2070 <sup>2</sup>	100	1	2	82	3.010	4.122	24.008	3.010	10.400	675.095

1VRES Histórico: Eventos simulados en base a modelos atmosférico VRES e hidrológico VIC, años 1986-2015.

2VRES 2070: Eventos simulados en base a los modelos atmosférico VRES e hidrológico VIC, años 2070-2099.

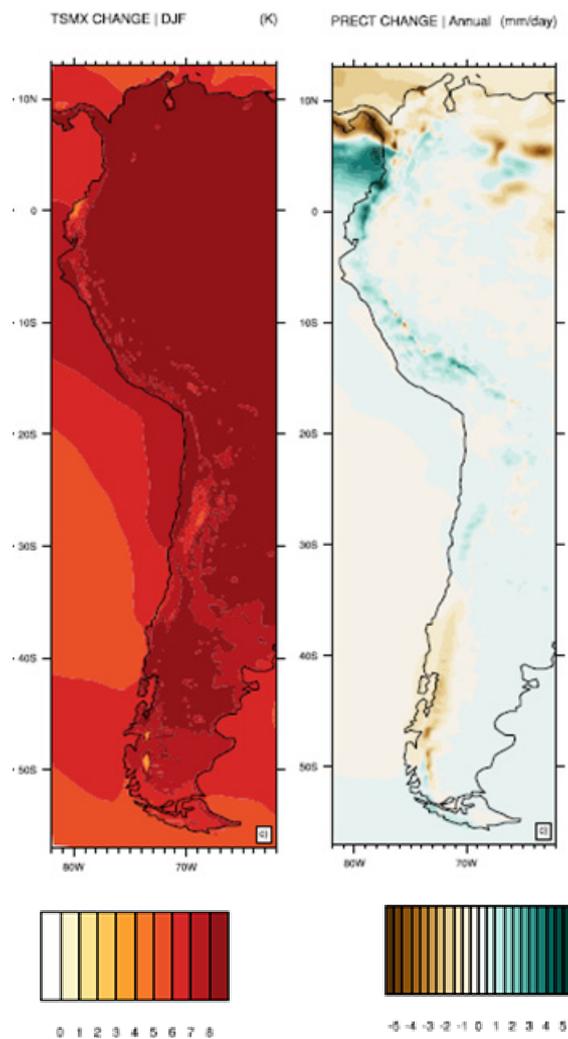


Figura 10. Cambios en la temperatura (K) promedio máxima diaria (izq) y cambios en la precipitación (mm/día) anual promedio (der) entre los periodos histórico (1985 – 2015) y futuro (2070 – 2100).

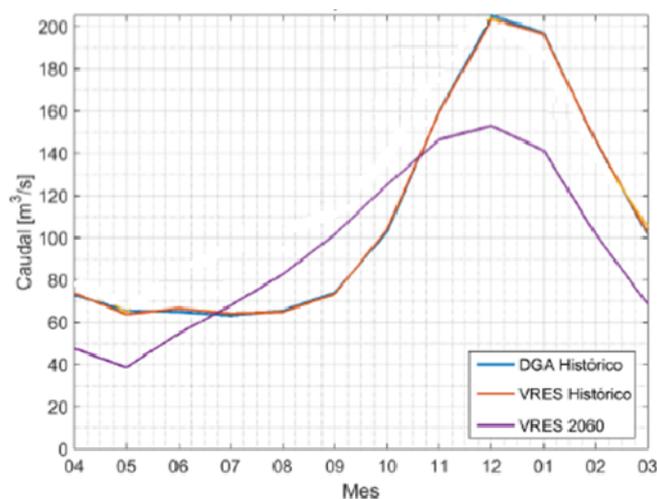


Figura 11 Curvas de Variación Estacional para el río Maipo en El Manzano, periodo histórico (1985 – 2015) y futuro (2070 – 2100) con forzantes VRES

#### 4. CONCLUSIONES

A través de estudios anteriores se ha podido comprobar que el fenómeno de la alta turbiedad si bien tiene ciertas relaciones con variables hidrometeorológicas usuales, tales relaciones no son lineales ni tampoco estrictas, lo que dificulta enormemente su predicción.

No es de extrañar entonces que en ambos casos presentados en este documento se hayan incorporado redes neuronales como aproximación para predecir turbiedades en función de pronósticos meteorológicos y simulaciones climáticas.

Además de lo anterior, ambos enfoques deben asumir las incertezas previas de los modelos hidrometeorológicos que les sirven de forzantes para la predicción de la turbiedad, lo que implica mermas adicionales en sus desempeños predictivos.

No obstante, ambas metodologías se consideran promisorias alternativas para abordar el desafío de intentar predecir el comportamiento del fenómeno de la turbiedad, tanto en el corto como en el largo plazo, las cuales es necesario seguir evaluando y desarrollando.

#### REFERENCIAS

Estudio del fenómeno de turbiedad en el río Maipo, DICTUC S.A., 2018

Modelo de Pronóstico Operacional de la Turbidez en el Río Maipo en Toma Independiente, Modelación Ambiental SpA, 2018

Evaluación de escenarios futuros asociados al fenómeno de turbiedad en río Maipo, DICTUC S.A., 2018

*Como citar este artículo:*

Poblete C., et al. (2020). Avances en el pronóstico operacional de corto plazo y la evolución futura de largo plazo del fenómeno de la turbiedad en el río Maipo. *Aqua-LAC* Volumen 12(2), 37-46. doi: 10.29104/phi-aqualac/



Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International  
CC BY-NC-SA 4.0 license