

Tendencia temporal de centros de masa de hidrogramas en Chile

Antoine Morales Maldonado⁽¹⁾, Enrique Muñoz Ortiz⁽²⁾, Diego Caamaño Avendaño⁽³⁾

⁽¹⁾ Estudiante, Carrera de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, aemoralesm@ing.ucsc.cl

⁽²⁾ Profesor Asociado, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, emunozo@ucsc.cl

⁽³⁾ Profesor Asociado, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, dcaamano@ucsc.cl

RESUMEN

El cambio climático es un fenómeno presente desde los orígenes del planeta. Producto de forzantes antrópicos principalmente, en los últimos siglos han aumentado de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), lo que ha ocasionado el preocupante aumento de la temperatura en el planeta, afectando al comportamiento del clima. Es por esto que surge la necesidad de elaborar métodos y/o modelos de predicción de los cambios climáticos.

Chile cuenta con una amplia variedad climática, tanto de norte a sur, como de cordillera a costa. El norte se caracteriza por la ausencia de sistemas frontales, producto del anticlón del pacífico sur. En la zona centro - sur, el anticlón va mermando su efecto, permitiendo la entrada de frentes de lluvia. La zona austral, se caracteriza por ser una zona desértica fría, con ausencia de precipitaciones, producto de la celda polar.

En esta investigación, se calculó la tendencia de centros de masa de hidrogramas anuales de caudales medios diarios para el periodo 1967 - 2017, a través de datos obtenidos de estaciones fluviométricas dispuestas en todas las cuencas hidrográficas de Chile y controladas por la Dirección General de Aguas (DGA).

El cálculo de tendencias de centros de masa, se llevó a cabo mediante el uso del método de Montecarlo y regresión lineal por mínimos cuadrados, donde se obtuvieron como resultado que en la zona norte y sur – austral de Chile los caudales se adelantaron y en la zona centro – sur se atrasaron.

Palabras Clave: cambio climático, hidrograma, caudal.

INTRODUCCIÓN

El cambio climático es un fenómeno natural que experimenta el planeta desde sus orígenes (AR5 – IPCC, 2014). Ha sido el encargado de eventos tales como, glaciaciones, desertizaciones, entre otros. Una de las principales causas de este fenómeno es el calentamiento global, cuyo efecto en el planeta se ha visto acelerado producto de forzantes antrópicas, que han permitido que las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), lleguen en altas concentraciones a la atmósfera, generando un aumento en la temperatura del planeta y así afectando principalmente al comportamiento climático. Este cambio en el comportamiento del clima, ha generado la necesidad de estudiar la tendencia histórica y futura de las temperaturas, precipitaciones y sus efectos en los caudales, con el fin de elaborar formas de abordar y disminuir posibles efectos adversos en el planeta y en la población (AR5 – IPCC, 2014).

Análisis de ruta realizados en ríos de alta montaña del pacífico norte, indican que la cantidad de precipitaciones han tenido el control dominante sobre la magnitud de los caudales, respecto a la escorrentía generada por el deshielo ocasionado por el aumento de temperatura y el tiempo en que afecta (Kormos et al. 2016).

En Chile, la distribución de caudales no tiene un comportamiento homogéneo debido a su cobertura geográfica. La zona norte se caracteriza por contar con ausencia de precipitaciones durante la mayor parte del año, lo que conlleva a que los ríos sean alimentados principalmente por deshielos originados en la cordillera de los Andes, producto de las alzas de temperatura. En cambio, la zona sur suele contar con gran presencia de precipitaciones durante la mayor parte del año, cuya influencia en la escorrentía de ríos es directamente proporcional (Alcañuz, 2015). Este comportamiento se ha visto alterado en las últimas décadas debido al efecto del cambio climático (AR5 – IPCC, 2014), por ello la necesidad de estudiar la tendencia temporal de los caudales en Chile, tanto históricos como proyecciones del comportamiento futuro.

Los registros de caudales en Chile, permiten estudiar la tendencia temporal histórica a través de hidrogramas unitarios anuales, cuyos centros de masa representan el promedio de la posición de todos los caudales registrados en el hidrograma, del cual se puede establecer una tendencia lineal que indicaría si estos se han adelantado o atrasado. Establecidas estas tendencias se puede determinar el origen de la variación temporal de los caudales y la variación en el impacto hidrológico. Según el informe “Estudio de la variabilidad climática en Chile para el siglo XXI” (CONAMA, 2006), en Chile hay dos aspectos derivados de la tendencia de centros de masa de hidrogramas de caudales, que tienen mayor impacto y destacan sobre los recursos hídricos; uno derivado del cambio de temperatura y otro de los cambios de precipitación. El primero dice relación con la reducción del área andina capaz de almacenar nieve entre las estaciones del año. Por otra parte, en cuanto a la pluviometría, con excepción de la región altiplánica en verano y el extremo austral en invierno, dominan las disminuciones. Cabe notar que en la estación invernal todo el territorio nacional comprendido entre las latitudes 30° S y 40° S, ve disminuida sus precipitaciones. La pérdida también se extiende al período estival por todo el territorio comprendido entre las latitudes 38° S y 50° S y aún más al norte por el sector andino.

Tales disminuciones pluviométricas se suman a la elevación de la isoterma cero para ofrecer un cuadro particularmente preocupante en las regiones Centro y Centro Sur (CONAMA, 2006).

En esta investigación se calcula la tendencia de los centros de masa de hidrogramas anuales (año calendario) de caudales medios diarios, para el periodo 1967 – 2017 en todas las cuencas hidrográficas de Chile controladas por la dirección general de aguas (DGA). Para esto, se trabajó con estaciones fluviométricas, cuyo procesamiento de datos se hizo a través de análisis de sensibilidad y modelación mediante regresión lineal por mínimos cuadrados.

ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio corresponde a todas las cuencas hidrográficas controladas por la Dirección General de Aguas (DGA) en Chile continental. Se trabajó con 822 estaciones fluviométricas dispuestas a lo largo del país, de las cuales se obtuvieron datos de caudales medios diarios.

La Figura 1, muestra la distribución de las estaciones fluviométricas a lo largo del país, las cuales van desde la latitud 17.842° S (norte grande) hasta la latitud 54.9469° S (extremo austral).

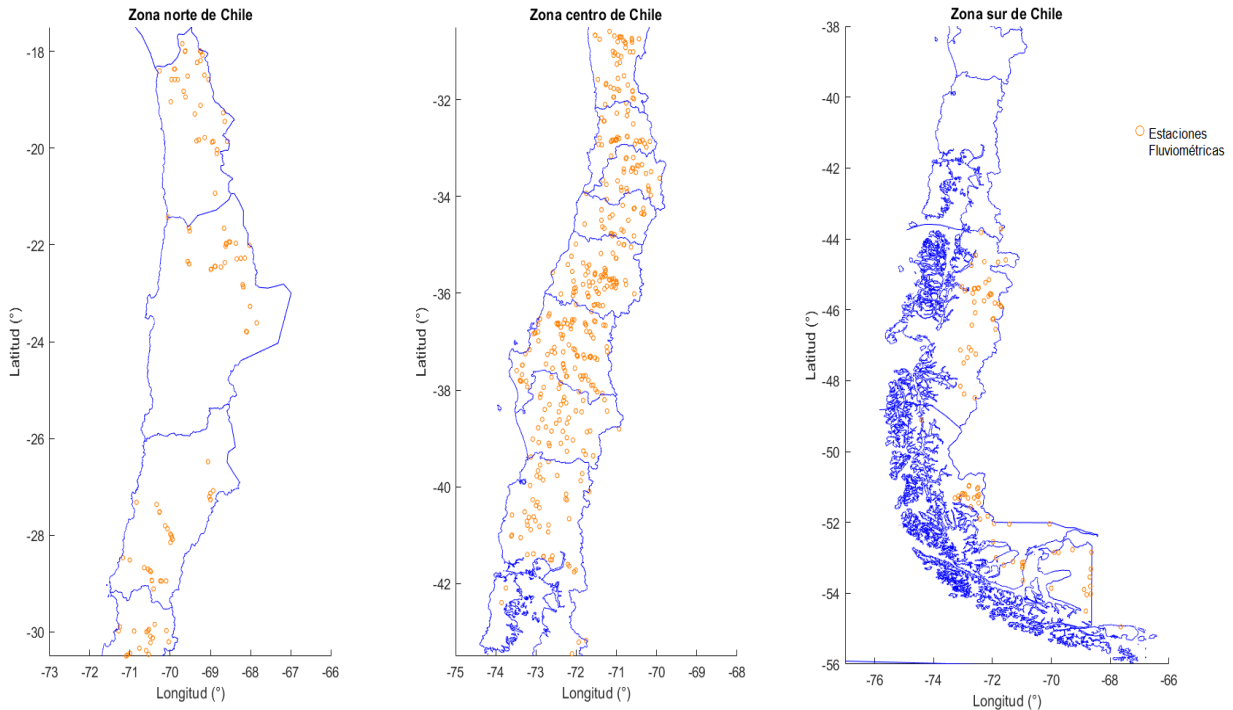


Figura 1: Distribución de estaciones fluviométricas que miden caudales medios diarios en m^3/s .

La zona norte de Chile ($17.5^\circ \text{ S} - 30^\circ \text{ S}$) posee un clima subtropical árido asociado a la fuerte influencia del anticiclón del pacífico sur, el cual produce un efecto de altas presiones, impidiendo el ingreso de cualquier perturbación atmosférica que pudiese generar lluvias. Este fenómeno se encuentra presente durante todo el año y es la razón de la desertización en el norte. Hacia el sur ($32^\circ \text{ S} - 45^\circ \text{ S}$), el clima se torna más templado, debido a que al estar más alejado del anticiclón del pacífico sur, este pierde su capacidad de bloqueo, permitiendo la entrada de sistemas frontales. Estos sistemas frontales varían su trayectoria latitudinalmente, en función de las estaciones del año. En el periodo invernal, abarcan principalmente entre las latitudes 30° S y 45° S . Durante el periodo estival y producto de que el anticiclón del pacífico sur se desplaza más hacia el sur, los sistemas frontales se concentran principalmente entre las latitudes 40° S y 55° S . En la zona más austral de Chile ($50^\circ \text{ S} - 54^\circ \text{ S}$), se registra una disminución de las precipitaciones, producto de la influencia de la celda polar, en donde se generan anticiclones polares permanentes.

La Figura 2, muestra la ubicación del anticiclón del pacífico sur para un año normal. La Figura 3, muestra la distribución de la celda polar en el hemisferio sur ($60^\circ \text{ S} - 90^\circ \text{ S}$).

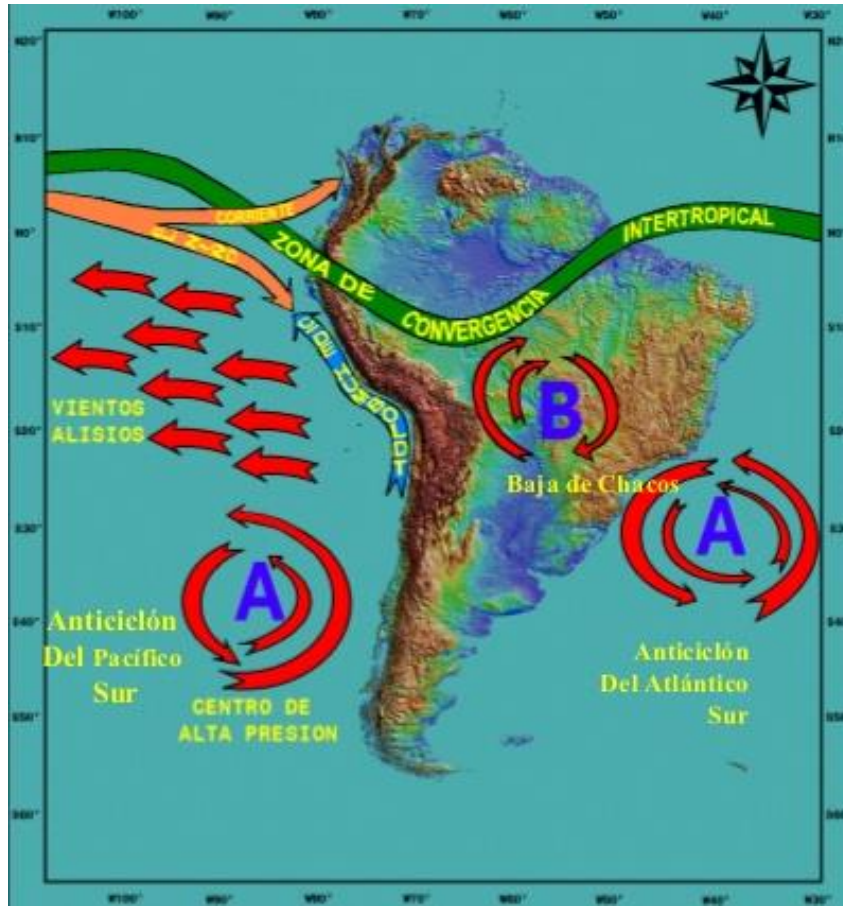


Figura 2: Localización del anticiclón del pacífico sur (Fuente: servicio nacional de estudios territoriales, ministerio del medio ambiente y recursos naturales, gobierno del Salvador.)

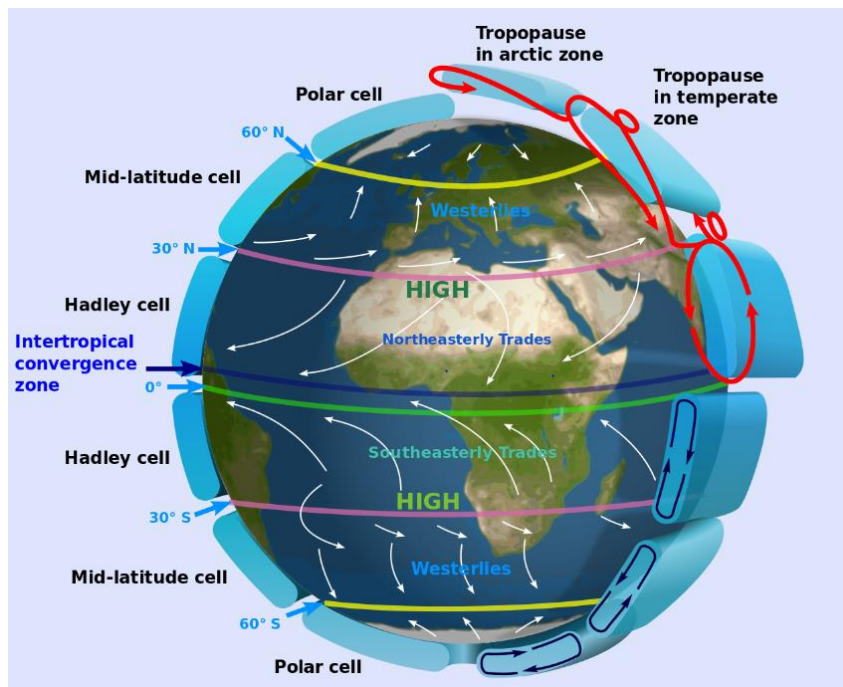


Figura 3: Ubicación de la celda polar en el planeta (Fuente: Agencia estatal de meteorología, Gobierno de España).

En la zona norte de Chile y en gran parte de la zona central, los ríos poseen un régimen nival, condicionado por la baja cantidad de precipitaciones por efecto del anticiclón del pacífico sur y la acumulación de nieve en

la cordillera de los Andes. En el norte grande, la elevación de la cordillera de los Andes oscila entre los 5000 y 6000 m.s.n.m. y disminuye a medida que se avanza hacia el sur.

Hacia el sur de Chile, el régimen hídrico se torna pluvial, pues el anticiclón del pacífico sur pierde influencia y la cordillera de los Andes disminuye su elevación, con lo cual merma su capacidad de acumular grandes cantidades de nieve, esto, además, se ve afectado por la elevación de la isoterma cero, la cual, dependiendo de la latitud, varía en elevación (disminuye hacia el sur). En consecuencia, los ríos son principalmente alimentados por las precipitaciones (ODEPA, 2018).

MÉTODOS

En el presente estudio, se calculó la tendencia de centros de masa anuales de hidrogramas de caudales medios diarios de estaciones fluviométricas para el periodo 1967 – 2017. Para llevar a cabo el estudio, se analizaron los datos disponibles con el fin de separar aquellos útiles de los que no. Para esto, se realizó un análisis de sensibilidad a los datos mediante el método de Montecarlo.

El método de Montecarlo, es un método estadístico que sirve para realizar simulaciones de series de datos no determinísticos. El análisis consiste en ejecutar, varias veces, diferentes sucesos variando aleatoriamente su valor, dependiendo de la función estadística que los define, obteniendo como resultado un conjunto de valores finales, de los cuales, se puede calcular el valor medio y la variabilidad. En esta investigación, el método fue usado principalmente para discriminar estaciones fluviométricas que tenían una cantidad considerable de datos faltantes.

Ya realizado el análisis de sensibilidad, se calcularon los centros de masa a las estaciones en estudio, los cuales fueron procesados a través del modelo de regresión lineal por mínimos cuadrados, obteniendo así, la tendencia lineal de los datos calculados.

El método de regresión lineal por mínimos cuadrados, permite encontrar la relación lineal a través de una recta de dos variables cuantitativas en un diagrama de dispersión, tal que, la distancia vertical de cada punto de la gráfica y la recta de regresión, sea la mínima. En esta investigación, se calcula la tendencia lineal entre la variable dependiente (años) y la variable independiente (posición temporal del centro de masa), lo cual representa el adelanto o retraso de caudales.

Análisis de sensibilidad y cálculo de centros de masa

Debido a la variabilidad climática del área de estudio y la ubicación de las estaciones fluviométricas, se detectaron problemas como: estaciones fluviométricas con datos faltantes (más del 50%), estaciones fuera de funcionamiento, entre otros. Para abordar la falta de datos, se aplicó el análisis de sensibilidad mediante el método Montecarlo, esto, con el fin de estimar el máximo de datos faltantes tolerables en las estaciones. Para la aplicación del método se dividió el área de estudio en 15 zonas (no homogéneas), las cuales representan las 15 regiones que posee Chile. Para cada una de las zonas se escogió una estación representativa, la cual debió cumplir con la condición de que tuviese todos los registros de caudales en 1 año calendario. En el caso de las zonas que presentaron más de una estación que obedeciera la condición impuesta, se escogió una de forma aleatoria. A cada estación representativa, se le aplicó el análisis de sensibilidad, el cual consistió en extraer una cantidad de “x” datos de registros de caudales de manera aleatoria, incrementando desde 1 hasta 100, para luego con el restante registro de caudales, calcular el centro de masa, replicándose lo anterior “n” – veces, donde “n” varía de 1 hasta 5000, en otras palabras y a modo de ejemplificar, se extrae 1 dato aleatorio 5000 veces, calculándose 5000 centros de masa distintos. Luego, se extraen 2 datos aleatorios 5000 veces, calculando otros 5000 centros de masa, esto se repitió 100 veces.

Mediante el análisis de sensibilidad se obtuvieron la cantidad de registros de caudales faltantes permitidos para poder calcular los centros de masa de las estaciones fluviométricas en el periodo 1967 – 2017. Aquellas estaciones, cuya cantidad de datos faltantes fue mayor a la determinada, no fueron utilizadas para el cálculo de centros de masa.

Para el cálculo de centros de masa, fueron considerados los registros de caudales medios diarios de cada año calendario, representados en hidrogramas de variables discretas, y se calcularon empleando la ecuación 1.

$$Cm = \frac{\sum_i m_i * r_i}{\sum_i m_i} \quad (1)$$

Donde, Cm: Centro de masa [día], m_i : Caudal medio diario asociado al dato i-ésimo [m^3/s], r_i : Ubicación del caudal medio diario i-ésimo, respecto al primero de enero de cada año[día].

Una vez realizadas todas las simulaciones, se representaron los datos calculados en un diagrama de cajas (1 diagrama por cada muestra representativa). La Figura 4, muestra el diagrama de cajas para la estación río Tres Brazos antes Bt. Sendos, correspondiente a la región de Magallanes y la Antártica Chilena.

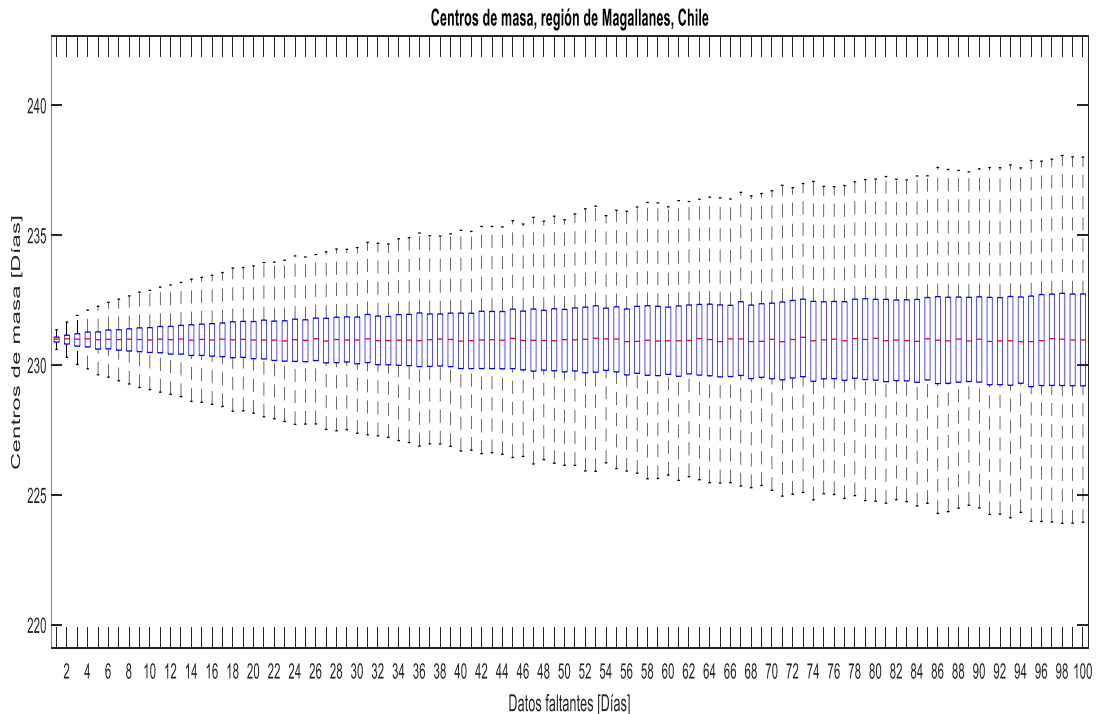


Figura 4: Análisis de sensibilidad del para estación río Tres Brazos antes Bt. Sendos, región de Magallanes y la Antártica Chilena, 2015.

De la Figura 4, se puede observar que, a medida que el número de datos extraídos va en aumento, la dispersión de los centros de masa también aumenta, es decir, tanto los percentiles 75 como 25 se van alejando de la mediana. Por sí solo, el diagrama de cajas no es suficiente, es por esto que se extraen los percentiles 75 y 25 cuya diferencia (ancho de banda) asociada a cada dato faltante, son representados en un gráfico de dispersión, y como consecuencia, lograr obtener la cantidad de datos faltantes permitidos. La Figura 5, presenta un gráfico de dispersión, en el cual se grafica el ancho de banda (variable dependiente) en función de los datos faltantes extraídos (variable independiente).

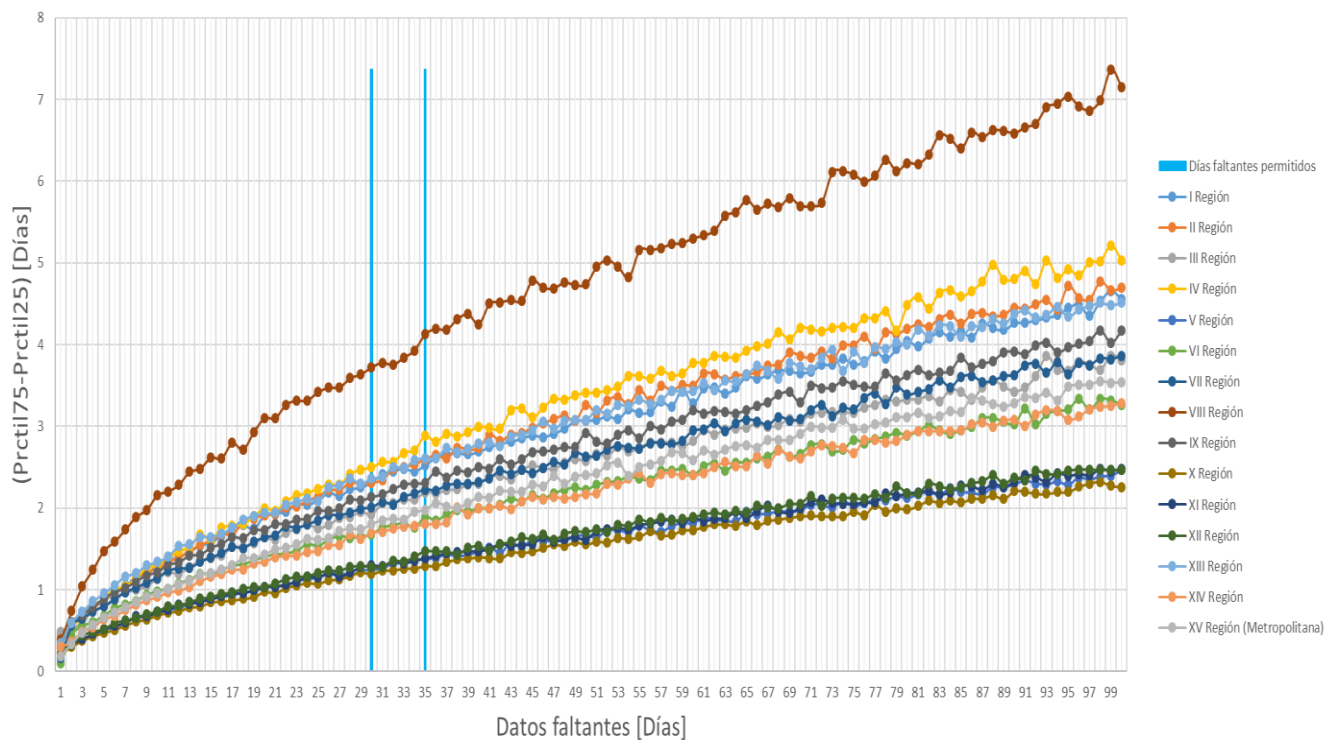


Figura 5: Análisis de sensibilidad para cada estación representativa de Chile, mediante el método Montecarlo.

De la Figura 5, se determinó para cada estación representativa la cantidad de datos faltantes permitidos. A modo de ejemplo, para la curva café (muestra representativa de la octava región), se observa que cuando el valor de la variable dependiente toma el valor de 4 [días], la variable independiente toma el valor de aproximadamente 35 [días], esto significa que, si se eligiese el valor mencionado de la variable independiente como la cantidad de datos faltantes permitidas para la octava región, dicho valor será usado para calcular todos los centros de masa correspondientes a las estaciones fluviométricas de dicha zona, esto implica que todas las estaciones de dicha zona, tendrán un error asociado de más menos 2 días respecto al valor real. Este procedimiento se replicó en cada una de las muestras representativas, obteniendo así, la máxima cantidad permitida de datos faltantes. La Tabla 1, muestra para cada zona representativa, la máxima cantidad de datos faltantes permitidos.

Tabla 1: Registro de caudales faltantes permitidos, obtenidos mediante análisis de sensibilidad.

Regiones	Datos faltantes permitidos [día]	Error asociado del centro de masa [día]
Arica y Parinacota	35	2.527
Tarapacá	35	2.598
Antofagasta	35	2.195
Atacama	35	2.884
Coquimbo	35	1.375
Valparaíso	35	1.890
Metropolitana	35	1.974
O'Higgins	35	2.227
Maule	35	2.312
BíoBío	30	3.724
Araucanía	35	1.292
Los Ríos	35	1.386
Los Lagos	35	1.475
Aysén	35	2.613
Magallanes	35	1.801

Calculo de tendencia de distribución de centros de masa

Mediante el cálculo de los centros de masa, se obtuvo la distribución de centros de masa para el periodo 1967-2017 de todas las estaciones fluviométricas utilizadas.

Para el cálculo de tendencia de los centros de masa, se utilizó el modelo de regresión lineal por mínimos cuadrados, el cual permite determinar la relación lineal (recta de regresión) que existe entre dos variables cuantitativas, donde el centro de masa corresponde a la variable dependiente y el año a la variable independiente. Dicha relación es representada por la ecuación 2 de la recta de regresión, la cual tiene la forma:

$$\hat{y} = a \pm b * x \quad (2)$$

Donde, \hat{y} : recta de regresión, a: intercepto de la recta de regresión con el eje de las ordenadas, b: pendiente de la recta de regresión, x: variable independiente.

Para efectos del presente estudio, sólo es de interés conocer el valor de la pendiente y su signo. La pendiente representa la razón de cambio [día/año] del centro de masa. El signo representa si la razón de cambio de la pendiente tiende al adelanto (signo negativo) o al atraso (signo positivo).

Debido a la cuantiosa cantidad de datos procesados, se calcularon las rectas de regresión mediante el uso de software de acceso libre (MATLAB), en donde, además, aquellas estaciones que presentaron menos de 2 centros de masa para el periodo 1967 -2017 no fueron consideradas.

En la Figura 6, se muestra a modo de ejemplo, la recta de regresión para la estación río Tres Brazos antes Bt. Sendos, región de Magallanes y la Antártica Chilena, para el periodo 1967 – 2017.

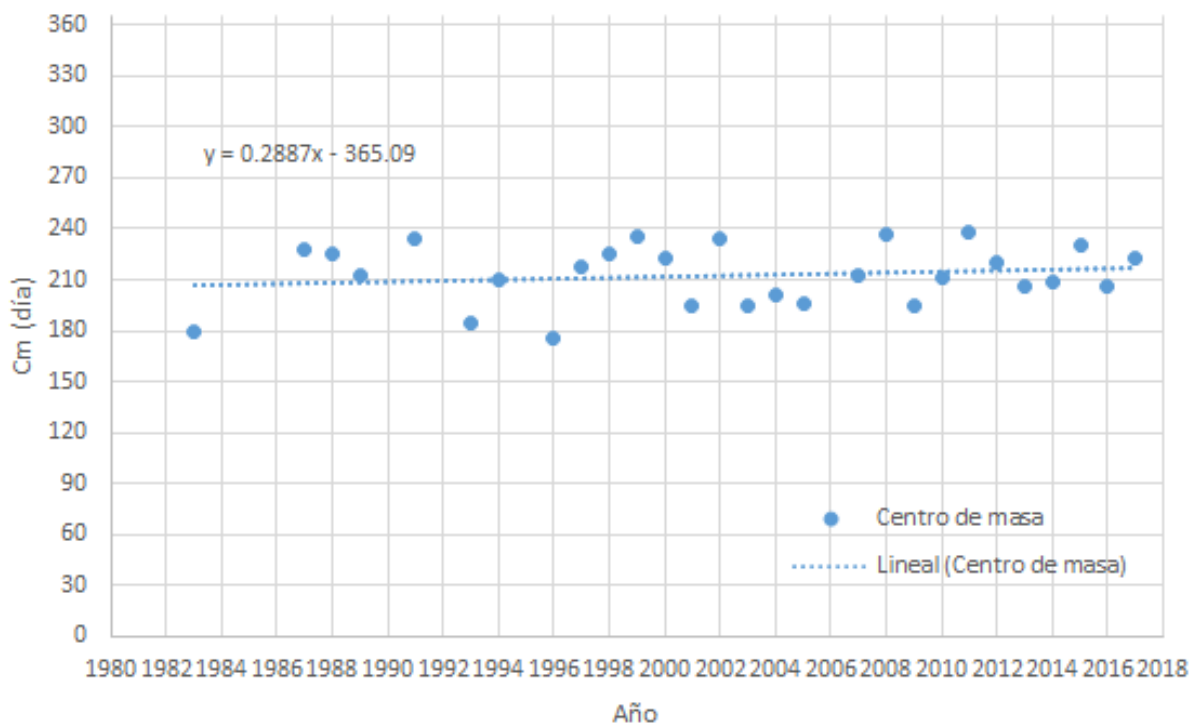


Figura 6: Aplicación de regresión lineal por mínimos cuadrados a estación de la región de Magallanes.

De la Figura 6, se observa que la magnitud de la pendiente es de 0.2887 día/año, y posee signo positivo. Con estos dos valores podemos afirmar que la estación río Tres Brazos antes Bt. Sendos, región de Magallanes y la Antártica Chilena, para el periodo 1967 – 2017, ha experimentado un atraso hacia finales de año en sus caudales.

RESULTADOS

Mediante el análisis de sensibilidad se descartaron un total de 41 estaciones fluviométricas. Estas representan un 5% del universo de estaciones consideradas inicialmente.

La Figura 7, muestra la tendencia de centros de masa calculados mediante regresión lineal por mínimos cuadrados en Chile continental, para todas las estaciones fluviométricas que no fueron descartadas mediante el análisis de sensibilidad. La Tabla 2, muestra la tendencia de centros de masa de las estaciones fluviométricas en Chile.

Tabla 2: Tendencia de Centros de masa en Chile continental, periodo 1967 -2017.

Zona	Adelanto	Atraso	Descartadas	Total
Norte	59 (37%)	58 (36%)	43 (26%)	160 (100%)
Centro	139 (27%)	231 (44%)	151 (29%)	521 (100%)
Sur	48 (48%)	39 (39%)	13 (13%)	100 (100%)
Total	246 (31%)	328 (42%)	207 (27%)	781 (100%)

De la Tabla 2, se observa que durante el periodo 1967 – 2017, los caudales de Chile, en general, han tendido al atraso, esto se puede asociar a diversos efectos producidos por el cambio climático.

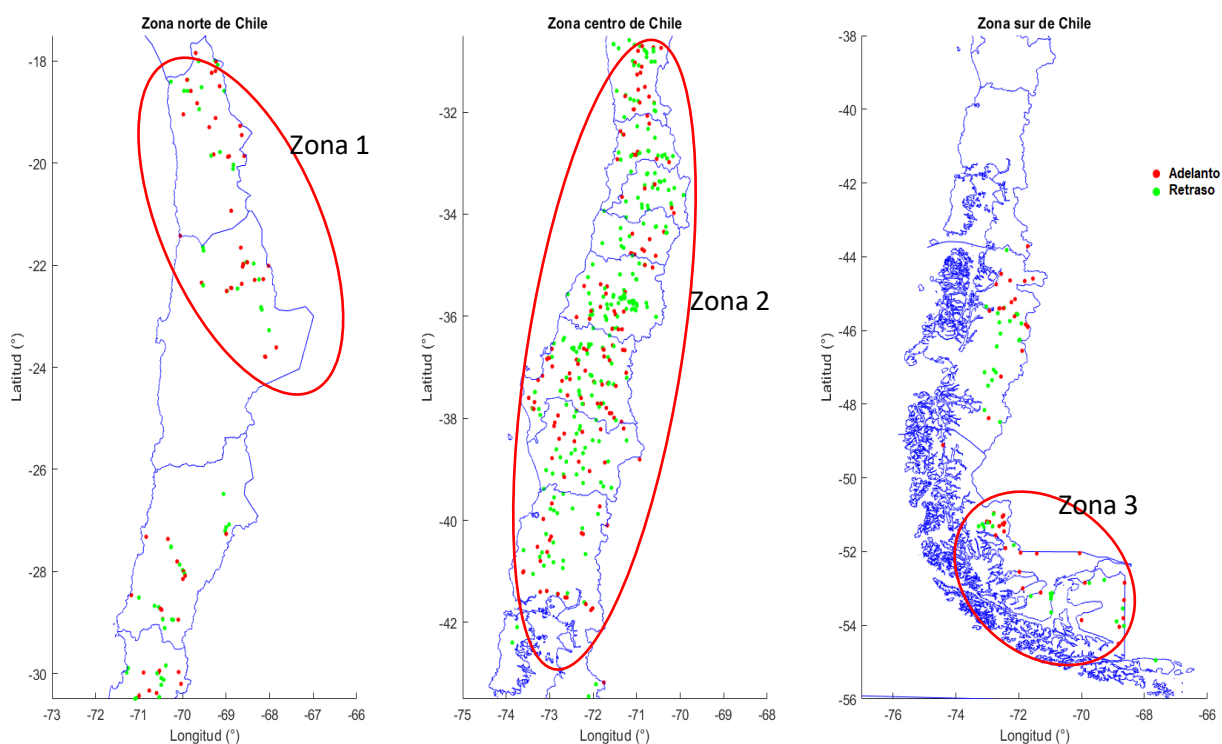


Figura 7: Tendencia de centros de masa en Chile continental, calculado mediante el método de regresión lineal por mínimos cuadrados.

De la Figura 7, se observan tres zonas con una tendencia predominante. La zona 1, comprendida entre las latitudes 18° S – 24° S aproximadamente, denota una tendencia al adelanto a una razón aproximada de 0.09 día/año, debido a que por la fuerte influencia del anticiclón del pacifico sur y el aumento en las temperaturas, provocando que la nieve acumulada en la cordillera de los Andes, se derrita prematuramente. La zona 2, comprendida entre las latitudes 30° S – 42° S aproximadamente, denota una tendencia al atraso a una razón aproximada de 0.6 día/año. La zona 3, comprendida entre las latitudes 50° S – 55° S, denota una tendencia de adelanto a una razón de 0.71 día/año, producto del efecto de la celda polar y el aumento de la temperatura.

CONCLUSIONES Y COMENTARIOS

Para el periodo 1967 – 2017, la tendencia de los centros de masa de caudales se ha comportado de la siguiente manera: el norte de Chile ha sufrido un leve adelanto (Ver Tabla 2), esto se debe principalmente al aumento de la temperatura en la cordillera de los Andes, haciendo que la nieve que se encuentra en alta montaña se comience a derretir prematuramente. En la zona centro – sur del país, se obtuvo una tendencia al atraso, lo cual es consecuente con otros autores que hablan de los efectos del cambio climático (disminución y retraso de

sistemas frontales) (Alcafuz, 2015), además, el atraso de los frentes de lluvia en la zona centro – sur, no sólo podría provocar problemas temporales, sino de distribución del recurso hídrico, ya que podrían concentrarse grandes cantidades de precipitación en periodos muy cortos de tiempo. En la zona sur, ocurre algo similar a la zona norte, ya que, el aumento de temperatura está haciendo que la criósfera se contraiga (Garreaud, 2011).

Si bien esta investigación abordó la temporalidad de los caudales a través del cálculo de tendencia de centros de masa de hidrogramas en Chile, es necesario seguir con el estudio exhaustivo del comportamiento climático, ya que únicamente estudiar Chile en forma general, es insuficiente para poder realizar predicciones más certeras.

REFERENCIAS

Alcafuz R. (2015). “Simulaciones climáticas para Chile entre los años 2030 – 2059”. Gobierno de Chile, Dirección meteorológica de Chile. Santiago, Chile.

AR5 – IPCC. (2014). *Long-term climate change: Projections, commitments and irreversibility*.

Christensen JH, Hewiston B, Busuioc A, Chen A, Gao X, Held I, Jones R, Kolli RK, Kwon RT, Laprise R, Magaña V, Mearns CG, Menendez CG, Raisanen J, Rinke A, Sarr A, Whetton P. (2007). “Regional Climate Projections”. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge Univ. Press, New York.

Corporación nacional del medio ambiente (CONAMA). (2006). *Estudio de la variabilidad climática en Chile para el siglo XXI*. Ministerio del medio ambiente. Chile.

Garreaud R. (2011). “Cambio climático: Bases físicas e impactos en Chile” *Revista tierra adentro – INIA No. 93*. Departamento de geofísica, Universidad de Chile, Chile.

Gudmundsson, L., Leonard, M., Do, H. X., Westra, S., & Seneviratne, S. I. (2019). *Observed trends in global indicators of mean and extreme streamflow*. *Geophysical Research Letters*, 46, 756–766. <https://doi.org/10.1029/2018GL079725>

Instituto nacional de estadística Chile. (2017). *Informe anual de medio ambiente*. Ministerio de medio ambiente. Chile.

IPCC, 2013: Glosario [Planton, S. (ed.)]. En: *Cambio Climático 2013. Bases físicas*. Contribución del Grupo de trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Stocker, T.F.,D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex y P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, Estados Unidos de América.

Kormos, P. R., C. H. Luce, S. J. Wenger, and W. R. Berghuijs. (2016). *Trends and sensitivities of low streamflow extremes to discharge timing and magnitude in pacific northwest mountain streams*. *Water Resour. Res.*, 52, 4990-5007, doi:10.1002/2015WR018125

Oficina de Estudios y Políticas Agrarias. (2016). “*El cambio climático y los recursos hídricos en Chile*”. Ministerio de agricultura. Chile.