

Estudio de ríos con herramientas en R: impactos del aprovechamiento forestal en Tierra del Fuego, Argentina

María Eugenia Lopez^{1,2,3}, Samanta Dodino^{1,2,4}, Érica Schlaps^{2,4}, Lucía Rodríguez-Planes^{2,3}

¹ Centro Austral de Investigaciones Científicas, Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Ushuaia, Tierra del Fuego, Argentina.

² Instituto de Ciencias Polares, Ambiente y Recursos Naturales, Universidad Nacional de Tierra del Fuego, Ushuaia, Tierra del Fuego, Argentina.

³ Dirección Regional Patagonia Austral, Administración de Parques Nacionales.

⁴ Instituto de Desarrollo Económico e Innovación, Universidad Nacional de Tierra del Fuego, Ushuaia, Tierra del Fuego, Argentina.

La actividad forestal puede alterar la dinámica hidrológica y térmica de los arroyos de cabecera, afectando la integridad ecológica de los sistemas fluviales. El monitoreo de condiciones hidrológicas (nivel de agua, caudal, temperatura, entre otros) requiere de un monitoreo exhaustivo en cuanto a frecuencia de registro de los datos. Esto se puede lograr mediante la instalación de sensores *in situ* que registran regularmente las variables durante plazos largos, generando grandes volúmenes de datos. El objetivo de este trabajo fue utilizar herramientas analíticas en R y generar un flujo de trabajo que permita analizar grandes volúmenes de este tipo de datos.

En la zona central argentina de la Isla Grande de Tierra del Fuego, se concentra más del 80% de la actividad forestal de la provincia. Se seleccionaron siete arroyos permanentes que discurren por bosques puros de lenga (*Nothofagus pumilio*). Estos cuerpos de agua fueron clasificados en dos grupos (*con manejo* y *sin manejo*) según el porcentaje de la cuenca afectada por manejo forestal. Se instaló un sensor de presión que registró la presión barométrica y la temperatura del agua, una vez por hora desde enero del 2018 a febrero del 2019. La presión medida por el sensor incluye tanto la generada por la columna de aire atmosférico como la correspondiente a la columna de agua. Dada la proximidad geográfica de los arroyos, se asumió que la presión atmosférica afectó de manera homogénea a todos los cuerpos de agua. Por lo tanto, las diferencias entre presiones se asocian a diferencias entre los niveles de agua de cada uno de los arroyos a lo largo del tiempo. Se definieron temporadas basadas en temperatura y precipitación para definir estaciones templada y fría.

Para explorar la diferencia entre grupos se estudió la relación entre temperatura y presión. Se elaboró un biplot utilizando la función `stat_ellipse()` (paquete `ggplot2` de R) y aplicamos el paquete SIBER, tradicionalmente utilizado en ecología isotópica, a un contexto hidrológico. Este uso novedoso de SIBER permitió generar métricas multivariadas (TA, SEA, SEAb) para cada arroyo y grupo, cuantificando la amplitud y heterogeneidad del espacio “ambiental”, en distintas estaciones. Esto demuestra que herramientas desarrolladas para una disciplina pueden adaptarse eficazmente a otras áreas de investigación, ofreciendo un enfoque novedoso. Los resultados mostraron que los arroyos con manejo forestal presentan mayor amplitud del espacio

ambiental total (TAmanejo ~13 veces mayor que TAsin manejo) y mayor heterogeneidad térmica (rangos más amplios en el eje de temperatura) en ambas estaciones analizadas.

Se analizaron los valores de presión absoluta como *proxy* de nivel de agua. Primero se realizó una caracterización exploratoria de cada serie de datos utilizando los paquetes *zoo* y *hydroTSM* (*smry()* y *hydroplot()*). Para analizar la similitud entre hidrogramas mediante la función *dtw()* (del paquete *dtw*) se generó una matriz de distancias pareadas, un mapa de calor de similitud (*geom_tile()*) y un cluster jerárquico (*hclust()*) para identificar arroyos con comportamientos hidrológicos afines. Además, se calcularon tamaños de efecto y métricas comparativas entre grupos mediante *rstatix* (*cohens_d()*). Finalmente, se establecieron umbrales para identificar eventos de alta presión absoluta asociados a aumentos del nivel hídrico. A partir de estos umbrales se detectaron secuencias continuas de horas con valores por encima del umbral empleando las funciones del paquete *data.table* (*rleid()*), lo que permitió agrupar lecturas consecutivas dentro de un mismo evento. Los eventos detectados se filtraron por duración mínima para excluir fluctuaciones menores y ruido instrumental. Finalmente, se visualizaron sobre las series temporales de cada arroyo mediante *ggplot2*, permitiendo comparar la frecuencia y magnitud relativa de crecidas entre arroyos. Adicionalmente, se estudió la relación entre la presión media diaria en función de los efectos fijos de arroyo, manejo y estación del año, con un modelo aditivo mixto (GAMM) que incorporó un efecto no lineal del día del año y una estructura de correlación temporal anidada en arroyo y manejo. Se probaron estructuras de autocorrelación temporal de orden 1 y 2 diarios, siendo el orden 1 relevante únicamente, y mostrando que es necesario considerar esta magnitud de autocorrelación en el modelado de las variables independientes.

En un contexto de creciente presión humana y cambio climático, es de vital importancia monitorear los rangos en las condiciones y respuestas hidromorfológicas de los ríos para identificar alteraciones en las dinámicas fluviales que requieran restauración y manejo, y que pueden quedar invisibilizados con el uso de valores promedio y herramientas que no capturan la complejidad de los datos en series temporales. Este flujo de trabajo en R demuestra la potencia de integrar procesamiento de datos, análisis multivariado y visualización de manera reproducible, y destaca la importancia de revisar datos que suelen abordarse siempre del mismo modo mediante perspectivas y herramientas analíticas ya consolidadas en otras disciplinas, permitiendo superar soluciones de nicho y abrir el análisis a enfoques más integradores y comparables.