

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA
XXVII CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

**EVALUACIÓN DE LOS EFECTOS DE UN INCENDIO FORESTAL EN EL
BALANCE HÍDRICO DE UNA CUENCA ANDINA**

ALEJANDRA STEHR.¹

RESUMEN

Los incendios forestales alteran significativamente la hidrología de las cuencas, aumentando la escorrentía superficial y reduciendo la evapotranspiración, la percolación y la recarga de aguas subterráneas, lo que genera respuestas más rápidas y menor capacidad de regulación. Este estudio evalúa el impacto de los incendios de 2017 en la cuenca del río Quepe (1.648 km², Región de La Araucanía) mediante el modelo hidrológico SWAT, enfocándose en la cuenca Puente Codinhue, que concentró el mayor porcentaje de área quemada. El modelo se calibró (1981-1999) y validó (2000-2011) con caudales diarios, obteniendo NSE de 0,62 y 0,58 y PBIAS <10%, confirmando su adecuado desempeño. La simulación post-incendio incorporó la pérdida de vegetación y los cambios en el suelo mediante ajustes al índice de área foliar (LAI_INT) y al número de curva (CN). En 2017 la evapotranspiración real disminuyó entre 26-35%, mientras que la escorrentía superficial aumentó de 20 mm a 235 mm. La percolación profunda y la contribución subterránea al caudal se redujeron hasta 36%, incrementando la producción hídrica total. Hacia 2019, la evapotranspiración mostró una recuperación parcial, pero la infiltración y la recarga continuaron limitadas. Estos resultados evidencian que los incendios de alta severidad generan impactos hidrológicos prolongados, destacando la necesidad de medidas de restauración como reforestación, mulching y estabilización de suelos para mejorar la resiliencia hidrológica ante el cambio climático.

¹ Profesora Asociada, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Concepción - email: astehr@udec.cl

1. INTRODUCCIÓN

Los incendios forestales generan impactos significativos en la hidrología de las cuencas, alterando tanto los regímenes de escurrimiento como la calidad del agua (Pacheco & Sanches Fernandes, 2021). Estos eventos modifican los patrones de flujo, aumentan la frecuencia e intensidad de las inundaciones y alteran parcial o totalmente los componentes del balance hídrico. Tras un incendio, la escorrentía incrementa la turbidez de los ríos, modifica las concentraciones de nutrientes y puede provocar contaminación por metales pesados (Abraham et al., 2017). Las consecuencias hidrológicas de los incendios varían según diversos factores, como la escala espacial, la severidad del fuego, el uso del suelo posterior al incendio, el tiempo transcurrido desde el evento y las condiciones climáticas (Ma et al., 2020; Soulis et al., 2021). La pérdida de vegetación reduce la capacidad de interceptación y absorción de agua, lo que se traduce en un aumento del escurrimiento superficial en el corto plazo (Abraham et al., 2017; Rodrigues et al., 2019; Venkatesh et al., 2020). A medida que los ecosistemas se regeneran, la disponibilidad hídrica en las cuencas tiende a disminuir de forma progresiva (Pacheco & Sanches Fernandes, 2021).

Los incendios forestales inducen alteraciones sustanciales en los componentes del balance hídrico. Diversos estudios documentan incrementos de caudal de hasta 150% tras eventos de fuego (Niemeyer et al., 2020; Greenbaum et al., 2021; Santos et al., 2019; Xu et al., 2022), acompañados de una reducción de la evapotranspiración proporcional a la severidad del incendio (Ma et al., 2020; Greenbaum et al., 2021; Xu et al., 2022). La capacidad de infiltración se ve comprometida, generando escorrentía superficial incluso bajo precipitaciones de baja intensidad (Ebel, 2020). La recarga de aguas subterráneas presenta respuestas contrastantes, dependiendo de la interacción entre infiltración, humedad del suelo e interceptación del dosel (Guzmán-Rojo et al., 2024; Venkatesh et al., 2020). En Chile central, los incendios de 2017 afectaron más de 518.000 ha, principalmente plantaciones forestales (54,7%) y bosque nativo (19,3%). La velocidad de recuperación hidrológica está condicionada por la topografía, el clima, la cobertura vegetal y la severidad del fuego, siendo los incendios de alta intensidad los que provocan alteraciones prolongadas mediante la formación de capas hidrofóbicas (Pacheco & Sanches Fernandes, 2021; Venkatesh et al., 2020).

Los avances en monitoreo, que integran observaciones satelitales y de terreno, han mejorado la evaluación de la severidad y la recuperación post-incendio, destacando el uso de índices de vegetación derivados de imágenes Landsat (Moazeni & Cerdà, 2024; Nájera De Ferrari et al., 2024). La recuperación hidrológica es más lenta en regiones áridas o con pendientes pronunciadas, donde se intensifican la erosión y la escorrentía (Greenbaum et al., 2021; Shakesby, 2011), mientras que las intervenciones activas, como la reforestación, favorecen la resiliencia del sistema (Rodrigues et al., 2019; Balocchi et al., 2020). A nivel global, la investigación se ha concentrado principalmente en Estados Unidos y Europa, con escasa representación en Sudamérica. En Chile, los estudios se han focalizado en la Cordillera de la Costa a partir de datos observacionales (Balocchi et al., 2020, 2022), aunque el modelamiento hidrológico, particularmente mediante SWAT, emerge como herramienta relevante para evaluar impactos y apoyar la gestión de recursos hídricos postincendio (Guzmán-Rojo et al., 2024; Silva et al., 2011; Venkatesh et al., 2020).

El objetivo de este estudio es evaluar el impacto de los incendios forestales sobre los componentes del balance hídrico en una cuenca de los Andes del sur, mediante la aplicación del modelo hidrológico SWAT, con énfasis en los cambios en escorrentía superficial, evapotranspiración, percolación y flujos subterráneos antes y después del fuego.

2. METODOLOGÍA

Área de Estudio

La cuenca del río Quepe, ubicada en la Región de La Araucanía, sur de Chile, abarca aproximadamente 1.648 km² en la cordillera de los Andes. Su cauce principal, de 105 km de longitud, es el principal afluente del río Cautín y nace en el Lago Quepe, recibiendo aportes de numerosos esteros, principalmente desde su ribera sur. La forma alargada de la cuenca influye en la retención de agua y el tiempo de respuesta de crecidas, alargando los recorridos de flujo. Como subcuenca del río Imperial, presenta un clima templado frío lluvioso, con precipitaciones anuales promedio de 1.553 mm, concentradas entre mayo y julio, y mínimos en enero y febrero. En zonas sobre 1.200 m s.n.m., la precipitación supera los 3.000 mm/año, con temperatura media de 8,4°C (DGA, 2004, 2017; Esse et al., 2014). El caudal medio anual del río Quepe alcanza 86 m³/s (Niemeyer, 1980). La cuenca está dominada por suelos franco-arenosos, condicionando la infiltración y los procesos hidrológicos.

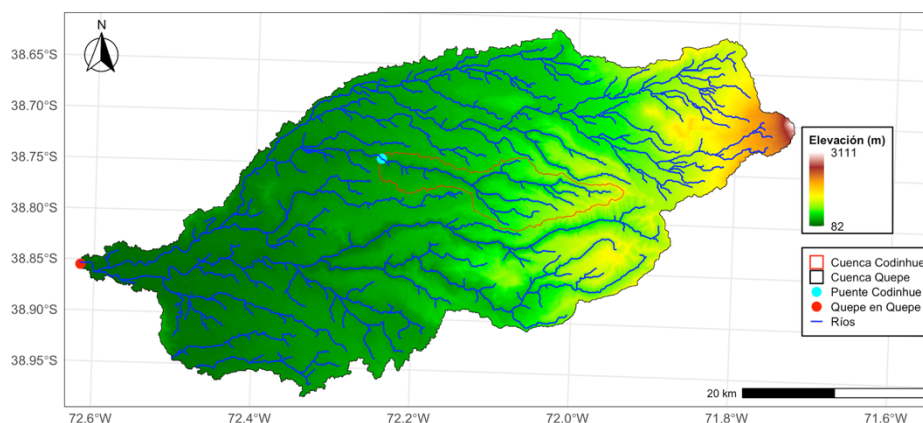


Figura 1. Área de Estudio

Modelación hidrológica y datos de entrada para SWAT

El modelo SWAT permite simular procesos hidrológicos a escala diaria, incluyendo escorrentía superficial, infiltración, percolación y flujo subterráneo. Para ello, subdivide la cuenca en subcuencas y, posteriormente, en Unidades de Respuesta Hidrológica (HRU), definidas por combinaciones únicas de uso de suelo, tipo de suelo y pendiente. La dinámica del balance hídrico se representa mediante la ecuación de balance de agua (Neitsch et al., 2011), mientras que la escorrentía superficial se estima con el método del Número de Curva (CN) del SCS, el cual considera la permeabilidad del suelo y el uso del suelo, demostrando su aplicabilidad en la zona de estudio (Aguayo et al., 2016; Stehr et al., 2008, 2010). La evapotranspiración potencial (ETP) se calcula mediante el método de Hargreaves, empleando

temperaturas máxima, mínima y media, y radiación extraterrestre. La evapotranspiración real se estima secuencialmente, considerando primero la interceptación por el dosel vegetal, luego la transpiración y, finalmente, la evaporación o sublimación según la cobertura de nieve. Los cambios post-incendio en la vegetación afectan de manera significativa la ETP y, por ende, la disponibilidad de agua en la cuenca.

El modelo representa la recarga y el flujo de retorno de aguas subterráneas mediante un sistema de dos acuíferos: uno somero, que aporta caudal a los cursos dentro de la subcuenca, y otro profundo, que descarga aguas más allá de los límites locales. El agua percolada se distribuye entre ambos acuíferos, contribuyendo tanto a la recarga como a la humedad del suelo durante periodos secos.

Como insumos, SWAT requiere un Modelo Digital de Elevación (MDE), mapas de uso de suelo y tipos de suelo, y series de precipitación y temperatura. En este estudio, se utilizó un MDE ALOS PALSAR de 12,5 m (Figura 1), datos de uso de suelo de CONAF (escala 1:50.000) (Figura 2a) y la base de suelos HWSD v2.0 (FAO & IIASA, 2023) (Figura 2b). La precipitación y temperatura provienen del producto grillado CR2MET (~5 km), desarrollado por el Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR2). Estos datos permitieron delinear la cuenca, extraer la red de drenaje, generar subcuencas y caracterizar espacialmente la variabilidad hidrológica, constituyendo la base para simular los efectos de los incendios sobre el balance hídrico.

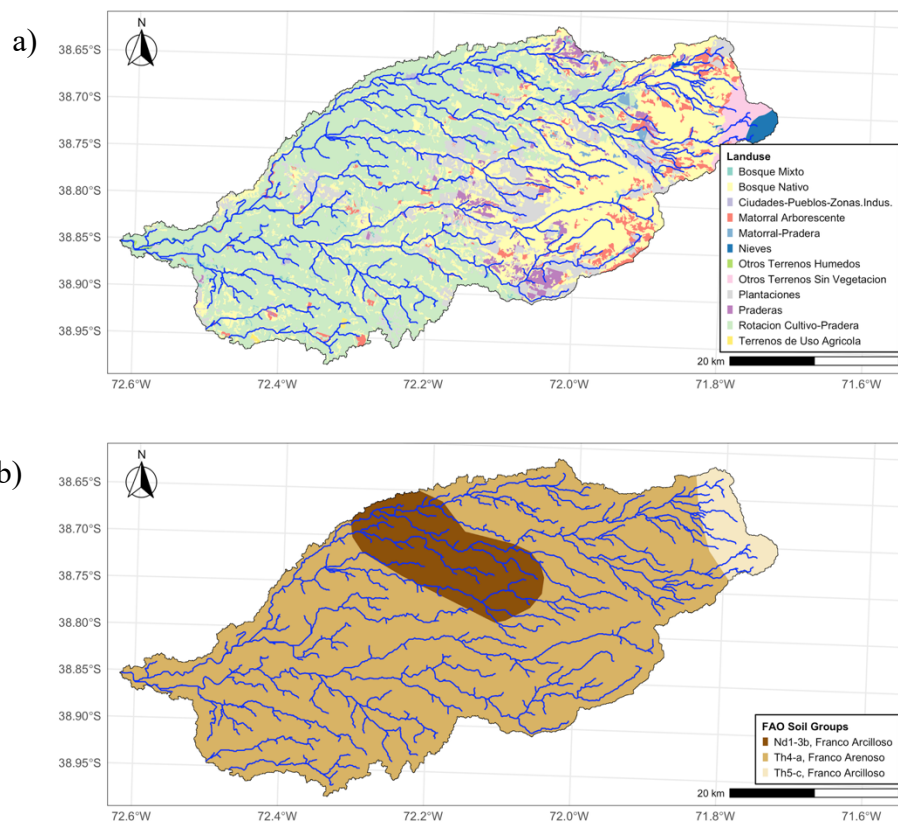


Figura 2. a) Uso del Suelo b) Tipo de suelo

Calibración y Validación

El modelo SWAT fue calibrado y validado con datos diarios de caudal de la estación “Quepe en Quepe” obtenidos de la DGA, utilizando el periodo 1981–1999 para calibración y 2000–2011 para validación. La calibración se realizó en SWAT-CUP empleando el algoritmo SUFI-2, con rangos de parámetros físicamente significativos y cientos de simulaciones para optimizar la representación hidrológica de la cuenca. Durante la calibración, se efectuó un análisis de sensibilidad identificando los parámetros más influyentes (CN2, SOL_AWC y GW_DELAY), los cuales controlan procesos clave como escorrentía, percolación y recarga subterránea. El desempeño del modelo se evaluó con los índices NSE (>0.50) y PBIAS ($\pm 25\%$), cumpliendo los criterios de Moriasi et al. (2012). Los resultados validaron la capacidad del SWAT para simular adecuadamente el comportamiento hidrológico de la cuenca.

Simulación de los componentes del balance hídrico antes y después del incendio

El modelo SWAT calibrado se empleó para simular el impacto de los incendios de 2017 sobre los componentes del balance hídrico. La figura 3 presenta las áreas quemadas en el incendio de 2017, donde el área quemada en la cuenca Puente Codinhue corresponde al 12,10% de su área total (108 km²). El año 2015 se utilizó como referencia pre-incendio por presentar una precipitación anual similar a la de 2017, aunque con máximos diarios más altos (115 mm vs 48 mm). La condición post-incendio se representó mediante mapas de cobertura generados a partir de imágenes satelitales, clasificando las áreas quemadas según el tipo de vegetación afectada (bosques, pastizales y matorrales), y ajustando parámetros como el índice de área foliar (LAI_INT) y el número de curva (CN) para reflejar la pérdida de cobertura y los cambios en el suelo. Con esta actualización, el modelo simuló la respuesta hidrológica alterada, evaluando cambios en escorrentía superficial, percolación, flujo subterráneo y evapotranspiración. Las diferencias pre y post-incendio se analizaron mediante pruebas t ($p < 0.05$), estadísticos descriptivos y cambios porcentuales, permitiendo identificar los componentes más afectados y estimar los tiempos de recuperación de la cuenca entre 2017 y 2019.

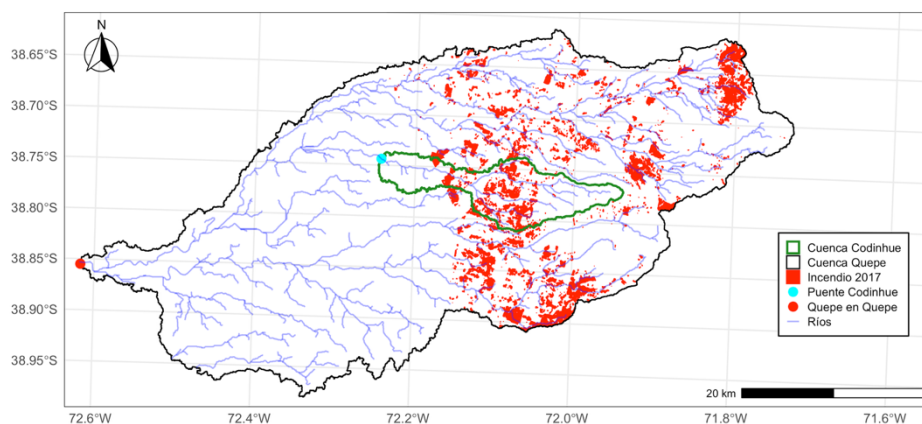


Figura 3. Área quemada incendio 2017

3. RESULTADOS

El modelo SWAT se calibró para el período 1981-1999 y se validó entre 2000-2011 (Figura 4), alcanzando valores de NSE de 0,62 y 0,58, respectivamente, y PBIAS cercanos a cero (6,3% y 7,5%). Estos indicadores reflejan una adecuada capacidad del modelo para reproducir los caudales de la cuenca sin sesgos significativos.

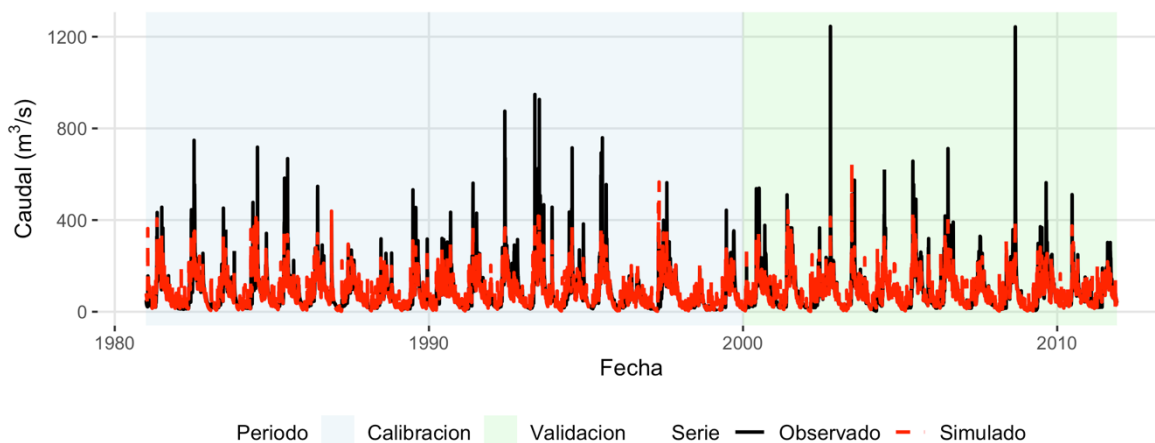


Figura 4. Caudales simulados y observados durante los periodos de calibración (1981 - 1999) y validación (2000 - 2011) estación fluviométrica Quepe en Quepe.

En lo que sigue, se presentan los resultados correspondientes a Puente Codinhue, la cuenca con mayor área quemada tras el incendio. El evento provocó cambios significativos en el balance hídrico entre los años post-incendio (2017–2019) y la condición pre-fuego (2015). La precipitación anual se mantuvo estable en 2017 y 2018, registrando un aumento significativo en 2019 respecto a 2015 (p -valor = 0,044) (Figura 5). La evapotranspiración real (ET) disminuyó de forma significativa tras el incendio, con su mayor reducción en 2017 (-26% a -35%), mostrando solo una recuperación parcial hacia 2019. En contraste, el escurrimiento superficial (SURQ) aumentó drásticamente, pasando de 20 mm en 2015 a 235 mm en 2017, manteniéndose elevado en 2018 y disminuyendo en 2019 (Figura 5).

La percolación profunda (PERC) y la contribución subterránea al caudal (GW_Q) mostraron descensos significativos durante todo el período post-fuego, alcanzando esta última una reducción de 36% en 2019 respecto a 2015. Como consecuencia, la producción hídrica total (WYLD) aumentó, reflejando una respuesta hidrológica más rápida y con menor capacidad de regulación.

El análisis espacial evidencia que las áreas quemadas presentan una disminución de ET y recarga subterránea (GW_RCHG), junto con un aumento de escurrimiento superficial (SURQ_GEN) y WYLD, coherente con la pérdida de vegetación y la degradación de suelos (Figura 6). En conjunto, los resultados confirman un impacto hidrológico marcado y persistente en la cuenca, con una reducción sostenida de la capacidad de infiltración y un incremento de las respuestas rápidas del sistema hídrico.

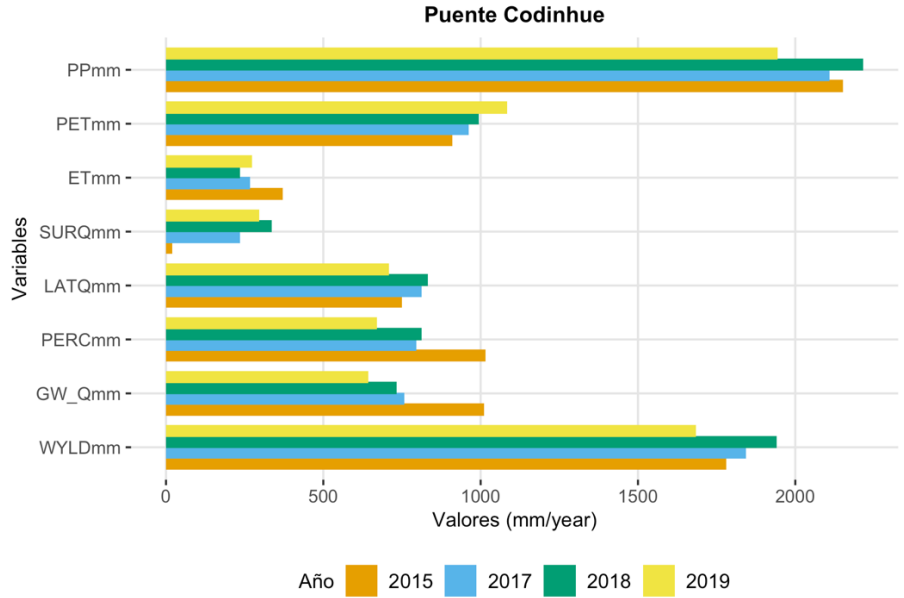


Figura 5: Componentes anuales del balance hídrico pre- y post-incendio.

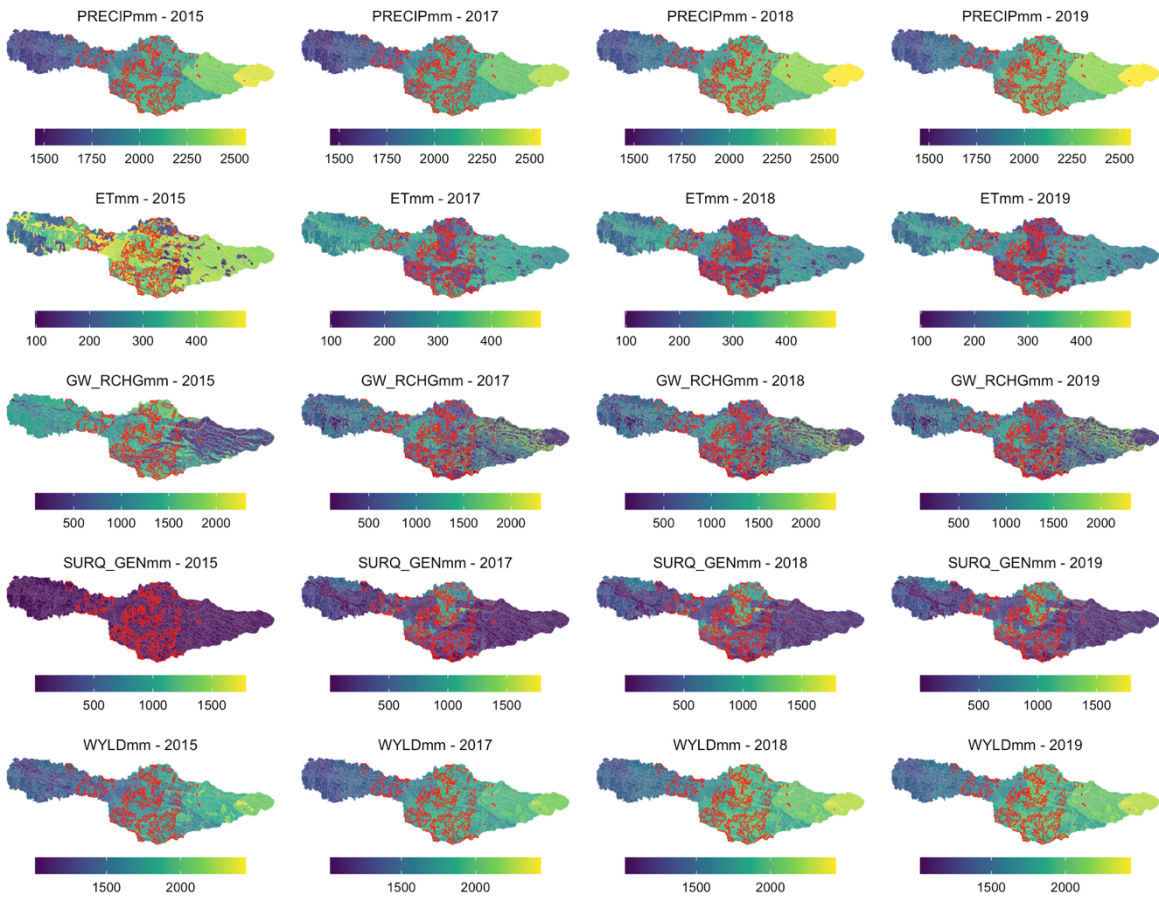


Figura 6: Distribución espacial de ET, GW_RCHG, SURQ_GEN y WYLD, destacando las áreas quemadas.

4. DISCUSION Y CONCLUSIONES

Los resultados de este estudio evidencian el impacto de los incendios forestales sobre la hidrología de la cuenca del río Quepe, con énfasis en los procesos observados tras los incendios. La modelación hidrológica mediante SWAT mostró que los incendios generan un aumento significativo de la escorrentía superficial, acompañado por reducciones en evapotranspiración, infiltración, percolación y recarga de aguas subterráneas. Estas alteraciones reflejan una pérdida de la capacidad de la cuenca para retener agua y regular el flujo, generando picos de caudal más rápidos tras eventos de lluvia y aumentando la vulnerabilidad a la erosión y transporte de sedimentos.

El análisis comparativo entre periodos pre y post-incendio indica que la pérdida de vegetación y la alteración del suelo (compactación e hidrofobicidad) son los principales responsables del cambio en el balance hídrico. La escorrentía se convirtió en el proceso dominante durante los tres años posteriores al incendio, mientras que la contribución subterránea al caudal disminuyó de manera sostenida. La disminución de la recarga de aguas subterráneas y la mayor exposición del suelo comprometen la recuperación ecológica y la seguridad hídrica en la cuenca.

Si bien el modelo SWAT reprodujo de forma satisfactoria los caudales anuales y estacionales, presentó limitaciones en la simulación de eventos extremos, como caudales mínimos y máximos. Esta limitación es común en cuencas post-incendio, debido a la heterogeneidad espacial de la severidad del fuego y a la compleja dinámica de recuperación de vegetación y suelos.

Desde el punto de vista de la gestión, los resultados resaltan la necesidad de implementar estrategias adaptativas para favorecer la infiltración y mitigar la escorrentía superficial. Medidas como la reforestación, el mulching y la estabilización de suelos pueden acelerar la recuperación funcional de la cuenca, reducir el riesgo de erosión y restablecer un balance hídrico más estable.

La integración de modelación hidrológica con planes de restauración permite no solo cuantificar los efectos post-incendio, sino también evaluar la efectividad de medidas de manejo orientadas a proteger los recursos hídricos y la integridad ecológica.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece el financiamiento entregado por los proyectos ACT210060 “Multi-scale effects of extreme forest fires on erosion, water, and biogeochemical cycle in natural and managed forest soils” y ATE220021 “Climate change and the sociohydrology of floods”

REFERENCIAS

Abraham, J., Dowling, K., & Florentine, S. (2017). Risk of post-fire metal mobilisation into surface water resources: A review. *Science of the Total Environment* (Vols. 599–600, pp. 1740–1755). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.05.096>

Aguayo, M., Stehr, A., & Link, O. (2016). Respuesta hidrológica de una cuenca de meso escala frente a futuros escenarios de expansión forestal. *Revista de Geografía Norte Grande*, 65, 197–214.

Balocchi, F., Flores, N., Neary, D., White, D. A., Silberstein, R., & Ramírez de Arellano, P. (2020). The effect of the ‘Las Maquinas’ wildfire of 2017 on the hydrologic balance of a high conservation value Hualo (*Nothofagus glauca* (Phil.) Krasser) forest in central Chile. *Forest Ecology and Management*, 477. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118482>

Balocchi, F., Rivera, D., Arumi, J. L., Morgenstern, U., White, D. A., Silberstein, R. P., & de Arellano, P. R. (2022). An Analysis of the Effects of Large Wildfires on the Hydrology of Three Small Catchments in Central Chile Using Tritium-Based Measurements and Hydrological Metrics. *Hydrology*, 9(3). <https://doi.org/10.3390/hydrology9030045>

DGA. (2004). Diagnóstico y Clasificación de los Cursos y Cuerpos de Agua según objetivos de Calidad - Cuenca del Río Imperial.

DGA. (2017). Actualización del Balance Hídrico Nacional - Informe Final.

Ebel, B. A. (2020). Temporal evolution of measured and simulated infiltration following wildfire in the Colorado Front Range, USA: Shifting thresholds of runoff generation and hydrologic hazards. *Journal of Hydrology*, 585. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124765>

Esse, C., Valdivia, P., Encina-Montoya, F., Aguayo, C., Guerrero, M., & Figueroa, D. (2014). Modelo de análisis espacial multicriterio (AEMC) para el mapeo de servicios ecosistémicos en cuencas forestales del sur de Chile. *Bosque*, 35(3), 289–299. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002014000300004>

FAO & IIASA. (2023). Harmonised World Soil Database version 2.0. In *Harmonized World Soil Database version 2.0*. FAO; International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA); <https://doi.org/10.4060/cc3823en>

Greenbaum, N., Wittenberg, L., Malkinson, D., & Inbar, M. (2021). Hydrological and sedimentological changes following the 2010-forest fire in the Nahal Oren Basin, Mt. Carmel Israel—a comparison to pre-fire natural rates. *Catena*, 196. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104891>

Guzmán-Rojo, M., Fernandez, J., d’Abzac, P., & Huysmans, M. (2024). Impacts of Wildfires on Groundwater Recharge: A Comprehensive Analysis of Processes, Methodological Challenges, and Research Opportunities. *Water*, 16(18), 2562. <https://doi.org/10.3390/w16182562>

Ma, Q., Bales, R. C., Rungee, J., Conklin, M. H., Collins, B. M., & Goulden, M. L. (2020). Wildfire controls on evapotranspiration in California's Sierra Nevada. *Journal of Hydrology*, 590. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125364>

Moazeni, S., & Cerdà, A. (2024). The impacts of forest fires on watershed hydrological response. A review. In *Trees, Forests and People* (Vol. 18). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.tfp.2024.100707>

Moriasi, D. N., Wilson, B. N., Douglas-Mankin, K. R., Arnold, J. G., & Gowda, P. H., (2012). Hydrologic and water quality models: use, calibration, and validation, *Transactions of the ASABE*, 55(4), 1241–1247. doi: 10.13031/2013.42265

Nájera De Ferrari, F., Duarte, E., Smith-Ramírez, C., Rendon-Funes, A., Sepúlveda Gonzalez, V., Sepúlveda Gonzalez, N., Levio, M. F., Rubilar, R., Stehr, A., Merino, C., Jofré, I., Rojas, C., Aburto, F., Kuzyakov, Y., Filimonenko, E., Dörner, J., Pereira, P., & Matus, F. (2024). Multi-temporal assessment of a wildfire chronosequence by remote sensing. *MethodsX*, 13. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2024.103011>

Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., & Williams, J. R. (2011). College of Agriculture and Life Sciences Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2009.

Niemeyer, H. (1980). Hoyas hidrográficas de Chile. DGA. <https://bibliotecadigital.ciren.cl/handle/20.500.13082/2348>

Niemeyer, R. J., Bladon, K. D., & Woodsmith, R. D. (2020). Long-term hydrologic recovery after wildfire and post-fire forest management in the interior Pacific Northwest. *Hydrological Processes*, 34(5), 1182–1197. <https://doi.org/10.1002/hyp.13665>

Pacheco, F. A. L., & Sanches Fernandes, L. F. (2021). Hydrology and stream water quality of fire-prone watersheds. In *Current Opinion in Environmental Science and Health* (Vol. 21). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2021.100243>

Rodrigues, E. L., Jacobi, C. M., & Figueira, J. E. C. (2019). Wildfires and their impact on the water supply of a large neotropical metropolis: A simulation approach. *Science of the Total Environment*, 651, 1261–1271. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.289>

Santos, R. M. B., Fernandes, L. F. S., Cortes, R. M. V., & Pacheco, F. A. L. (2019). Hydrologic impacts of land use changes in the Sabor river basin: A historical view and future perspectives. *Water (Switzerland)*, 11(7). <https://doi.org/10.3390/w11071464>

Shakesby, R. A. (2011). Post-wildfire soil erosion in the Mediterranean: Review and future research directions. In *Earth-Science Reviews* (Vol. 105, Issues 3–4, pp. 71–100). <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2011.01.001>

Silva, J. S., Vaz, P., Moreira, F., Catry, F., & Rego, F. C. (2011). Wildfires as a major driver of landscape dynamics in three fire-prone areas of Portugal. *Landscape and Urban Planning*, 101(4), 349–358. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2011.03.001>

Stehr, A., Aguayo, M., Link, O., Parra, O., Romero, F., & Alcayaga, H. (2010). Modelling the hydrologic response of a mesoscale Andean watershed to changes in land use patterns for environmental planning. *Hydrology and Earth System Sciences*, 14(10). <https://doi.org/10.5194/hess-14-1963-2010>

Stehr, A., Debels, P., ROMERO, F., & ALCAYAGA, H. (2008). Hydrological modelling with SWAT under conditions of limited data availability: evaluation of results from a Chilean case study. *Hydrological Sciences Journal*, 53(3), 588–601. <https://doi.org/10.1623/hysj.53.3.588>

Soulis, K. X., Generali, K. A., Papadaki, C., Theodoropoulos, C., & Psomiadis, E. (2021). Hydrological Response of Natural Mediterranean Watersheds to Forest Fires. <https://doi.org/10.3390/hydrology8>

Venkatesh, K., Preethi, K., & Ramesh, H. (2020). Evaluating the effects of forest fire on water balance using fire susceptibility maps. *Ecological Indicators*, 110. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105856>

Xu, Z., Zhang, Y., Zhang, X., Ma, N., Tian, J., Kong, D., & Post, D. (2022). Bushfire-Induced Water Balance Changes Detected by a Modified Paired Catchment Method. *Water Resources Research*, 58(11). <https://doi.org/10.1029/2021WR031013>