

## **Erosión Hídrica de Suelos: Revisión Bibliográfica sobre Causas, Impactos y Modelación**

Schoninger Fátima <sup>a,b,\*</sup>, Fernández José Javier<sup>a</sup>, Rodríguez Darío Tomás <sup>a</sup>, Vich Alberto Ismael Juan<sup>c</sup>, Ariana Giselle Seufert <sup>a,b</sup>, Gustavo Gabriel Prytz Nilsson <sup>a,b</sup>, Viera Iglesias Camilo José <sup>d</sup>

<sup>a</sup> *Universidad Nacional de Misiones. Facultad de Ingeniería. Misiones, Argentina.*

<sup>b</sup> *Becario doctoral Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Tecnológicas (CONICET).*

<sup>c</sup> *Universidad Nacional de Cuyo. Departamento de Geografía, Facultad de Filosofía y Letras. Mendoza, Argentina. Centro Científico Tecnológico CONICET - MENDOZA.*

<sup>d</sup> *Universidad Federal de Santa María (UFSM), Tecnólogo en Geoprocesamiento, Estudiante de maestría en Ciencias del Suelo,*

e-mails: [fatima.schoninger@fio.unam.edu.ar](mailto:fatima.schoninger@fio.unam.edu.ar), [jose.fernandez@fio.unam.edu.ar](mailto:jose.fernandez@fio.unam.edu.ar), [dario.rodriguez@fio.unam.edu.ar](mailto:dario.rodriguez@fio.unam.edu.ar), [ajvich@mendoza-conicet.gob.ar](mailto:ajvich@mendoza-conicet.gob.ar), [ariana.seufert@fio.unam.edu.ar](mailto:ariana.seufert@fio.unam.edu.ar), [gustavo.prytznilsson@fio.unam.edu.ar](mailto:gustavo.prytznilsson@fio.unam.edu.ar), [camilo.iglesias@acad.ufsm.br](mailto:camilo.iglesias@acad.ufsm.br)

---

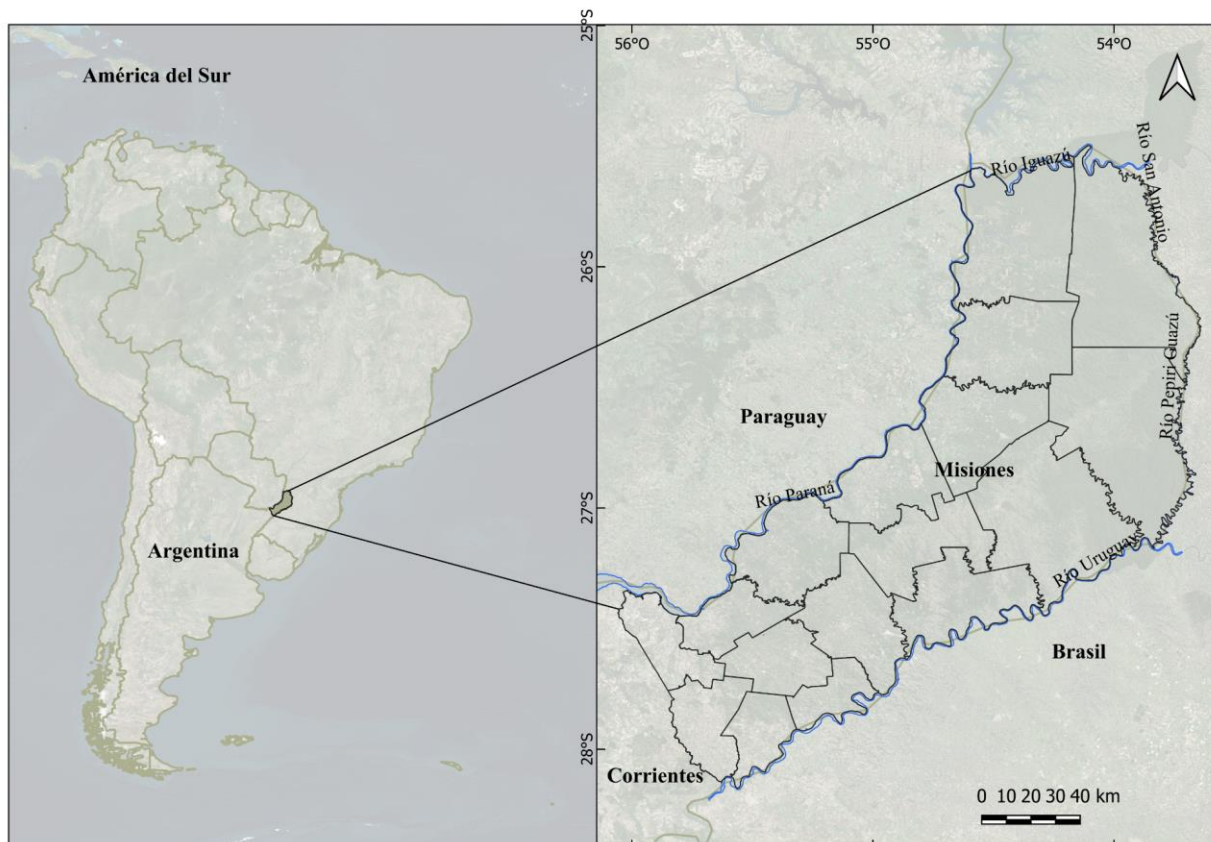
### **Resumen**

La degradación del suelo por erosión hídrica es un fenómeno complejo donde el suelo es erosionado, transportado y depositado; lo cual es intensificado por la deforestación y prácticas agrícolas inadecuadas. Este proceso disminuye la fertilidad del suelo y la rentabilidad de los cultivos, afectando severamente a regiones con pendientes elevadas como la provincia de Misiones. Para cuantificar este problema se han desarrollado varios modelos de predicción de pérdida de suelo. La Ecuación Universal de Pérdida de Suelos (USLE/RUSLE) es una herramienta clásica, pero presenta limitaciones al no poder analizar cuencas completas. Por ello, existen modelos más avanzados de base física como Water Erosion Prediction Project (WEPP) o Soil and Water Assessment Tool (SWAT), Storm Water Management Model (SWMM) que son más detallados, aunque también más exigentes en datos; y modelos desarrollados en Argentina como EROSUP y CTSS8-SED. En Misiones, la expansión de la frontera agrícola y la explotación forestal aumentan la vulnerabilidad del suelo. Ante este escenario, se vuelve fundamental integrar los modelos de predicción con herramientas geoespaciales. Esta sinergia permite evaluar con mayor precisión los riesgos de erosión y desarrollar estrategias de conservación efectivas para una gestión sostenible, integral del territorio, asegurando la productividad a largo plazo.

**Palabras Clave** – *Erosión, Suelos, Modelos, Misiones.*

## 1 Introducción

En el noreste argentino, se encuentra la provincia de Misiones, con una superficie de 29.801 km<sup>2</sup>, entre los paralelos 25° 28' y 28° 10' de Latitud Sur, y los meridianos 53° 38' y 56° 03' de Longitud Oeste, cuenta con un clima subtropical sin estaciones seca, donde las precipitaciones tienen un módulo pluviométrico aproximado de 1900 mm [1-4].



**Fig. 1. Ubicación Geográfica, Fuente: Elaboración Propia.**

Rodeada por grandes ríos como el Río Uruguay, Río Iguazú y el Río Paraná, limitando al este y norte con la República Federativa del Brasil, al oeste con la República del Paraguay y al suroeste con la provincia argentina de Corrientes, es la región que más conserva la Selva Paranaense autóctona [5]. El relieve de la provincia es amesetado, debido a la erosión hídrica y eólica del macizo de Brasilia. Esto ha dado origen a sierras, la altitud decrece en dirección NE-SO desde los 800 msnm en Bernardo de Irigoyen, hasta los 100 msnm en las cercanías de Apóstoles y San Javier. Los suelos rojizos, característicos de esta provincia, han sido generados por la descomposición de rocas ricas en hierro. En la siguiente imagen, se puede observar que casi la totalidad de los límites de esta provincia se trazaron a partir del recorrido de ríos y arroyos visibles en azul, trazo irregular y grosor variable [6].



**Fig. 2. Provincia de Misiones.**

En las últimas décadas, la provincia de Misiones ha experimentado una transformación progresiva de sus condiciones hidroambientales, marcada por una mayor frecuencia de eventos extremos, como sequías prolongadas y precipitaciones intensas en cortos períodos [7], [8]. Estos fenómenos, combinados con la creciente impermeabilización de los suelos y el reemplazo de la selva Paranaense por cultivos extensivos, han generado un incremento significativo en los caudales de escorrentía superficial, favoreciendo así el avance de los procesos erosivos.

El desarrollo agrario actual, caracterizado por la expansión de la frontera agrícola y la producción de monocultivos [9], ha intensificado el uso del suelo, muchas veces sin la incorporación de prácticas de conservación adecuadas. Esta presión sobre el territorio se ve agravada por la antropización de las cuencas hidrográficas, la deforestación masiva y la consecuente reducción de la cobertura vegetal, factores que han contribuido notablemente al deterioro de la estabilidad del suelo y a una mayor susceptibilidad a la erosión hídrica.

Como resultado, la erosión hídrica se posiciona como el principal problema que compromete la sustentabilidad de los sistemas productivos en la región, al generar una pérdida permanente del recurso edáfico [8]. Los alcances de la erosión hídrica van más allá de la simple pérdida de suelo ya

que afectan a las estructuras socioeconómicas, la calidad del agua, la biodiversidad y la seguridad alimentaria mundial. El desafío no radica sólo en comprender estos procesos, sino también en comprometerse con la investigación científica, con la gestión práctica del uso de la tierra y la formulación de políticas para diseñar estrategias eficaces y sostenibles que mitiguen los efectos adversos de la erosión hídrica [10]. Para ello, se ha trabajado en traer la realidad hidrológica de la región en estudio a un medio en el cual se puedan controlar las variables que intervienen y así simular el impacto de los cambios en la cuenca, parcela o el área en estudio. Una herramienta imprescindible para el tratamiento de los datos de entrada son los Sistemas de Información Geográfica (SIG) [11].

Este artículo tiene como finalidad presentar las principales componentes de la erosión hídrica en la provincia de Misiones, como así también dar a conocer las principales causas y consecuencias.

## **2 Metodología**

El presente trabajo realiza una revisión bibliográfica sistemática sobre la erosión hídrica, con un enfoque en estudios realizados a nivel mundial, en Latinoamérica y Argentina, finalmente haciendo foco en Misiones y sus alrededores. Se analizaron diferentes documentos científicos, citando solamente los más relevantes, con el fin de identificar tendencias, metodologías y estrategias de mitigación.

## **3 Resultados**

Las principales causas de la degradación de los suelos incluyen la erosión hídrica, la aplicación intensa de agroquímicos y la deforestación [10]. La degradación del suelo, en sus dimensiones física, química y biológica, se manifiesta a través de la pérdida de cobertura vegetal, la disminución de la fertilidad, y la contaminación tanto del suelo como del agua. Estas alteraciones impactan negativamente en la productividad agrícola, reduciendo el rendimiento de los cultivos y, en consecuencia, afectando su rentabilidad [12].

El transporte de sedimentos se produce sobre la superficie del suelo y en profundidad cuando el suelo que está compuesto de roca madre sufre una alteración. La erosión es un proceso progresivo, y se ve afectado por factores ambientales como el clima, tiempo, presencia de restos vegetales y animales y por el relieve, donde en las montañas se erosiona el suelo y en los valles se depositan los sedimentos. A mayor pendiente, mayor erosión, por el arrastre de los sedimentos ante el efecto de la escorrentía debido a las lluvias. No todo el suelo que se erosiona llega al punto de control de la cuenca, sin embargo, la parte que lo hace es la que genera los sedimentos de la cuenca, los cuales se pueden cuantificar.

Según [7], menciona que Chaves (2010) destaca la importancia de cuantificar la pérdida de suelo que se produce en las cuencas. Se llevaron a cabo investigaciones al respecto y la posibilidad de replicar las metodologías en regiones geográficas similares, evaluando su eficiencia y calibrando los parámetros según las características de cada región. Los efectos del proceso de erosión hídrica de los suelos comprometen la sustentabilidad de los sistemas agropecuarios disminuyendo su productividad con afectación directa en la economía [13].

La erosión hídrica ha cobrado una creciente relevancia a nivel global, especialmente en países tropicales y subtropicales donde la economía depende en gran medida del uso del suelo para actividades agropecuarias [12]. Los modelos de predicción de la erosión, como la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE) y su versión revisada (RUSLE) se basan en la ecuación 1. Dado que la lluvia es el agente principal de la erosión hídrica, la cuantificación precisa de su erosividad es

fundamental para evaluar los riesgos asociados y desarrollar estrategias eficaces de conservación de suelos [14] [15].

$$A = R \times K \times LS \times C \times P \quad (1)$$

Donde A es la pérdida de suelo anual estimada.

El factor relacionado con la lluvia es R que es el factor de erosividad. Los factores relacionados al suelo, K la erodabilidad del suelo, L el largo y S la pendiente. C es el factor que tiene en cuenta la cobertura y manejo de las prácticas agrícolas y P las prácticas conservacionistas, ambos relacionados al uso de la tierra. Los estudios realizados generalmente buscan evaluar la magnitud de la erosión y sus posibles consecuencias en el medio ambiente.

Sin embargo, el modelo USLE posee algunas limitaciones ya que requiere experimentación previa (ajuste y calibración) para cada clima, suelo y manejo (con parcelas de escorrentía), y los resultados no pueden ser extrapolados a sitios con características diferentes. El modelo USLE sólo permite estimar tasas de erosión promedio anual, no de eventos individuales de precipitación. Tampoco puede utilizarse para estimar erosión a nivel de cuenca, solo a nivel de ladera. Estas limitaciones fueron estudiadas e incorporadas en su versión Revisada (RUSLE) [16].

Generalmente para estimar los procesos de erosión de cuenca a escala se utilizan modelos determinísticos, según [17] estos modelos se clasifican en empíricos, conceptuales, de base física o una combinación de ellos, de acuerdo a la profundidad del abordaje. En función de la escala de tiempo que se modela pueden ser clasificados en continuos o de eventos. Por otro lado, de acuerdo a la representación de los parámetros del modelo, las variables de estado, las condiciones de borde y los datos de entrada y salida, los modelos pueden definirse como agregados, distribuidos o semidistribuidos [18].

Los modelos empíricos son aquellos que, mediante formulaciones pretenden interpretar los mecanismos erosivos por sus causas y efectos. Son más simples que los conceptuales y de base física y, en general, requieren menor cantidad de datos. Son modelos de lógica inductiva y, generalmente, de aplicación únicamente a las condiciones para los que fueron desarrollados y calibrados. Además, asumen la condición de que el sistema se encuentra invariante durante el experimento [19].

Los modelos conceptuales representan un papel intermedio entre los modelos empíricos y de base física, pero permiten una mayor adaptación a la realidad integrando modelos hidrológicos y de erosión, para obtener como resultado, la emisión de sedimentos a la salida de la cuenca (hidrograma de sólidos), si bien son capaces de describir los procesos fundamentales que gobiernan la erosión, no alcanzan el nivel de detalle de descripción del fenómeno como los de base física.

Los modelos de base física incorporan en su análisis leyes de conservación de masa y energía, utilizando la ecuación de continuidad para representar un estado de la conservación de la materia y su transformación en el espacio y tiempo [20]. Estos modelos, consideran que se produce deposición una vez superada la capacidad de transporte del flujo superficial o del canal. Además, describen detalladamente, a lo largo de toda la unidad de discretización, el movimiento de las partículas desagregadas o depositadas, siendo diferentes las ecuaciones utilizadas por cada uno.

La modelación empírica es útil para la estimación tanto de producción de sedimentos como de pérdida de suelo, en forma continua en áreas que puedan ser evaluadas de manera agregada en toda la extensión de la cuenca. Resulta de utilidad para realizar las primeras estimaciones del comportamiento del sistema y la tasa de erosión general a escala anual o plurianual.

En cuencas de orden 1, las cuales no tienen afluentes, como las existentes en la mayoría del territorio de Misiones, se requiere la descripción detallada de la variabilidad espacial y temporal de las propiedades de la cuenca y de la precipitación, y por tal razón, los modelos en base física distribuidos son los más apropiados para este tipo de análisis [21]. Sin embargo, diversos autores proponen que estos últimos deben ser aplicados de manera cuidadosa porque al ser más complejos, presentan problemas de parametrización, solicitud de datos poco realistas y/o condiciones de aplicación no extrapolables a otras regiones [22], [23]. No hay un modelo que resulte óptimo para todos los problemas y situaciones geográficas, por lo tanto, es razonable la modificación continua de los modelos existentes y el desarrollo de otros nuevos [17].

Los Modelos de producción de sedimentos a escala de cuenca han sido desarrollados basados en la formulación empírica de USLE, ejemplos de ellos son AGNPS [23], SWRRB [24], RUSLE [25], Soil and Water Assessment Tool (SWAT) [26]. Respecto a los modelos conceptuales se pueden citar: HSPF [27], SWRRB [27], EMSS [28] y LASCAM [29].

En lo que concierne a modelos de base física y distribuidos se han desarrollado: ANSWERS [30], Water Erosion Prediction Project (WEPP) [31], KINEROS [32], CASC2D-SED [33], EROSET [34], LISEM [35] [36], entre otros.

El modelo Storm Water Management Model (SWMM) es de uso libre y de mayor utilización a nivel mundial y nacional, ha demostrado un comportamiento satisfactorio para la modelación de cuencas en la región misionera [7]. Este modelo posee un módulo de calidad de agua que puede ser enmarcado dentro de los modelos sedimentológicos conceptuales, permitiendo estudiar la generación, entrada y transporte de cualquier tipo de contaminante, los cuales pueden ser los sedimentos. La acumulación y arrastre de los mismos desde las áreas de las cuencas se determinan a partir de los usos del suelo asignados a dichas áreas.

Además, es posible introducir cargas de sedimentos en los distintos elementos del sistema de desagües pluviales, tanto durante las precipitaciones como en tiempo seco.

A nivel nacional, se han diseñados diversos modelos matemáticos de producción, transporte y deposición de sedimentos. Particularmente, el Departamento de Hidráulica de la Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería Agrimensura de la Universidad Nacional de Rosario (DH-FCEIA-UNR) han desarrollado diversos módulos sedimentológicos que permiten acoplar los modelos hidrológico-hidráulicos, a diferentes escalas espaciales y temporales. El modelo EROSUP [37] estima la producción media anual a nivel de cuenca mediante la utilización de USLE e información SIG del clima, topografía, tipo de suelo, cobertura vegetal y usos del suelo. El CTSS8-SEDMU [38] evalúa la producción por evento a nivel de cuenca mediante la utilización de MUSLE y el acople al modelo hidrológico-hidráulico CTSS8. De manera similar el modelo CTSS8-SED [38] permite calcular la tasa de disgregación del suelo por impacto de la lluvia y por el flujo sobre el terreno, el transporte de sedimentos y los procesos de disgregación y sedimentación en las celdas valle y celdas río.

Dado que los modelos empíricos no tienen en cuenta el depósito de sedimentos en la ladera, se ha producido una tendencia a desarrollar modelos de simulación basados en procesos físicos [39].

El modelo WEPP [40] tiene la capacidad de predecir la erosión (escurrimiento y sedimento) en tormentas individuales, incluyendo eventos catastróficos, y los riesgos asociados con el transporte de sustancias químicas llevadas en los sedimentos. Además, WEPP puede estimar eventos extremos, períodos de retorno, tiempo real de erosión y el riesgo de escorrentía [40]. Este modelo es sensible a las diferencias observadas en las prácticas de cultivos, labranza y otras formas de manejo, ya que estima diariamente el estado del suelo y de la vegetación, y en el caso de que ocurran precipitaciones, calcula la infiltración y el escurrimiento.

El Grupo de Investigación Interdisciplinario sobre Erosión Superficial e Hidrología (GIPEHS) de la Universidad Federal de Rio Grande do Sul [41], está enfocado a encontrar soluciones a problemas relacionados con la escorrentía superficial y la erosión. Para ello utilizan técnicas de monitoreo y modelamiento de cuencas rurales que les permite estudiar los fenómenos hidrológicos y de erosión que ocurren en diferentes condiciones de relieve, suelo, uso de la tierra y manejo, recomendando mejores prácticas para la conservación de suelo y agua a escala de cuenca hidrográfica.

La planificación se lleva a cabo utilizando modernas herramientas de monitoreo y modelado matemático para la gestión de la escorrentía y el control de la erosión. Los resultados proporcionan una mayor disponibilidad de agua para los agricultores, una reducción de las pérdidas por erosión, así como una mejor calidad del agua y el control de las inundaciones.

En lo que respecta a las investigaciones sobre la erosión hídrica en Misiones, se encuentra el estudio realizado por el INTA (Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria) [42], cuyo objetivo fue elaborar un mapa de riesgo de erosión hídrica potencial, aplicando la ecuación universal de pérdida de suelo (USLE) y utilizando como base el Mapa Edafológico de la provincia. El análisis se centró exclusivamente en el potencial de erosión asociado a la intensidad de las precipitaciones, considerando superficies con suelo desnudo y sin prácticas de conservación implementadas. El estudio se realizó a una escala macro, sin adoptar la cuenca como unidad de gestión ni tener en cuenta los usos y ocupaciones reales del suelo. Concluyendo que cerca del 63% de las tierras de Misiones presentan muy altos riesgos de pérdidas por erosión hídrica.

La expansión de la frontera agrícola se ha identificado como la mayor amenaza del bosque en la región misionera y como consecuencia la variabilidad climática. El incremento de los cultivos como soja, caña de azúcar, maíz, trigo, tabaco, yerba mate, té y plantaciones de pino y eucalipto, además de la cría de ganado, la caza con fines comerciales, culturales o de subsistencia, las altas tasas de crecimiento poblacional y el escaso conocimiento de los problemas ambientales de la ecorregión por parte de sus pobladores, entre otras causales, son los responsables de la degradación de la selva sumado a la explotación tradicional del monte nativo [5], [43]. Las estrategias de control de la erosión se orientan principalmente al fortalecimiento del desarrollo regional agrícola y a la mitigación de procesos de desertificación y degradación de tierras. Este enfoque implica el desarrollo, adaptación y aplicación de herramientas tecnológicas que permitan predecir modificaciones en la dinámica erosiva bajo la influencia de actividades antrópicas, mediante la proyección de escenarios futuros hipotéticos asociados a cambios en el uso del suelo, en los sistemas productivos, y a las tendencias derivadas del cambio climático [12].

#### **4 Conclusiones**

La erosión hídrica representa una de las principales amenazas a la sostenibilidad de los suelos en regiones agrícolas como Misiones, donde la combinación de intensas precipitaciones, pendientes pronunciadas y prácticas productivas no conservacionistas intensifican los procesos de degradación de los suelos. Si bien modelos USLE y RUSLE son ampliamente utilizados para estimar la pérdida de suelo, sus limitaciones han impulsado el desarrollo de enfoques más integrales, como los modelos conceptuales y de base física, capaces de simular procesos erosivos a diferentes escalas temporales y espaciales.

La aplicación adecuada de estos modelos, junto con el monitoreo de cuencas y el uso de sistemas de información geográfica (SIG), permite estimar la pérdida de suelo, proyectar escenarios de riesgo ante el cambio de uso del suelo y el cambio climático. Sin embargo, su implementación requiere

información precisa con datos confiables, calibración local y una comprensión profunda de los procesos hidrosedimentológicos.

Debido al retroceso de la selva paranaense y el ritmo de la expansión de los sistemas productivos, se vuelve imperativo consolidar políticas de conservación del suelo sustentadas en conocimientos técnico-científicos que permitan la articulación entre modelos predictivos, planificación territorial y prácticas sostenibles como estrategia clave para mitigar la erosión, mejorar la productividad y resguardar los recursos hídricos y ecológicos de la región.

## Referencias

- [1] F. Silva, B. Eibl, y E. Bobadilla, «F. Silva, B. Eibl, E. Bobdilla, “Características de la Precipitación Durante 1981-2012 en Eldorado Misiones”, Revista Forestal Yvyrareta, vol 21, pp 36-42. 2014», vol. 21, pp. 36-42, 2014.
- [2] G. Prytz Nilson, A. Seufert, S. Ulrich, y F. Schoninger, «Gestión de cuencas hidrográficas: Aplicaciones de SIG para mediciones pluviométricas.», 9° Jornadas de Investigación, Desarrollo Tecnológico, Extensión, Vinculación y Muestra 2019. Facultad de ingeniería-UNaM, Oberá, Misiones., 2019. [En línea]. Disponible en: <https://autoresjidetev.fio.unam.edu.ar/index.php/jidetev/article/view/541>
- [3] J. Fernández, «J.J. Fernandez. “Código Python para el análisis de datos históricos de Precipitación de la Provincia de Misiones”», Salao do Conhecimento 2022, Unijui, Ijuí,Brasil, 2022.
- [4] F. Schoninger, D. T. Rodriguez, A. I. Vich, y J. J. Fernández, *F. Schoninger, D. T. Rodriguez, A. I. J. Vich y J. J. Fernandez. MAPA DE ISOHIETAS A PARTIR DE DATOS DE PRECIPITACIONES DE SATELITE EN LA PROVINCIA DE MISIONES. () Livro de Resumos Pag 388-390* [https://drive.google.com/file/d/1pueWZ\\_Hv3mV-kSPWV2Wf0Mb5Er68fGL1/view](https://drive.google.com/file/d/1pueWZ_Hv3mV-kSPWV2Wf0Mb5Er68fGL1/view). 5a Congreso de Ingenierías y Ciencias Aplicadas de las Tres Fronteras (MEC3F), 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.even3.com.br/mec3f2024/>
- [5] G. de la P. de M. Instituto Provincial de Estadísticas y Censos, *Gran Atlas de Misiones*. 2015.
- [6] «Provincia de Misiones -Terra MODIS - 30 de Septiembre de 2015», Argentina.gob.ar. Accedido: 1 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.argentina.gob.ar/ciencia/conae/educacion-y-formacion-masiva/materiales-educativos/provincia-de-misiones-terra-modis-30-de-septiembre-de-2015>
- [7] D. T. Rodriguez, «Estudio de dinámica de los excedentes hídricos superficiales en cuencas urbanas de alta pendiente y sus implicancias en los procesos erosivos. Caso de estudio región urbana de la ciudad de Oberá, Misiones», Universidad Nacional de Rosario Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura, 2018.
- [8] Roberto R. Casas, Rubén E. Godagnone, y Juan C de la Fuente, «Evaluación y cartografía de la erosión hídrica en la Argentina», *7 noviembre 2022*, n.º 6/11, p. 15, 2022.
- [9] S. Ester, J. Carlos, y M. José, «ANÁLISIS DE UN MODELO DE PLANIFICACIÓN CON ABORDAJE ESTRATÉGICO PARA FERIAS FRANCAS DE LA PROVINCIA DE MISIONES», 2020.
- [10] «FAO - Manejo sostenible del agua en América Latina y el Caribe | Oficina Regional de la FAO para América Latina y el Caribe», FAO-RLC. Accedido: 29 de octubre de 2024. [En

- línea]. Disponible en: <https://www.fao.org/americas/priorities/soil-and-water-conservation-in-latin-america-and-the-caribbean/es>
- [11] AmbGEO, *Live 17 - Geoprocessamento aplicado à modelagem hidrológica e de sedimentos #GEOTALKING*, (22 de junio de 2021). Accedido: 30 de junio de 2025. [En línea Video]. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=8XA48ZcJDmU>
- [12] «FAO- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura», FAOHome. Accedido: 29 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.fao.org/home/es>
- [13] N. E. Echeverría, A. G. Vallejos, y J. C. Silenzi, «Erodabilidad de suelos del sur de la Región Semiárida argentina», *Ciencia del suelo*, vol. 24, n.º 1, pp. 49-57, jul. 2006.
- [14] W. H. Wischmeier y D. D. Smith, *Predicting Rainfall Erosion Losses. Agricultural Research Service Handbook U.S.D.A., Washington, 1978.*
- [15] N. C. Brady y R. R. Weil, *Elementos da Natureza e Propriedades dos Solos*. Bookman Editora, 2009.
- [16] K. G. Renard, G. R. Foster, G. A. Weesies, y J. P. Porter, «RUSLE: Revised universal soil loss equation», *Journal of Soil and Water Conservation*, vol. 46, n.º 1, pp. 30-33, 1991.
- [17] P. A. Basile, G. A. Riccardi, E. D. Zimmermann, y H. R. Stenta, «P. Basile, G. Riccardi, E. Zimmermann y H. Stenta, “Simulation of erosion-deposition processes at basin scale by a physically-based mathematical model,” *International Journal of Sediment Research*, vol. 25, pp. 91-109, 2010», *2010*, vol. 25, pp. 91-109.
- [18] «Mathematical Modeling of Watershed Hydrology», *2002*, vol. 7, n.º 4, pp. 270-292.
- [19] A. J. Almorox, B. F. López, y S. Rafaellis, «La degradación de los suelos por erosión hídrica. Métodos de estimación.», 2010.
- [20] R. Pizarro, C. Morales, L. Vega, C. Olivares, R. Valdés, y F. Balochi, «Propuesta de un modelo de erosión hídrica para la región de Coquimbo, Chile.», *UNESCO: Programa Hidrológico Internacional (PHI)-Universidad de Talca*, 2009.
- [21] J. Zambrano Nájera y M. Gómez Valentín, «Estimación de la producción y transporte de sedimentos en cuencas urbanas pequeñas a escala de evento mediante un modelo de base física basado en SIG», *Universitat Politècnica de Catalunya*, 2015. doi: 10.5821/dissertation-2117-95706.
- [22] D. A. Woolhiser, «Search for Physically Based Runoff Model—A Hydrologic».
- [23] R. Young, C. Onstad, D. Bosch, y W. Anderson, *AGNPS: Agricultural Non-Point Source pollution model: A large watershed analysis too*. United States Department of Agriculture, 1987.
- [24] J. Williams y A. D. Nicks, «Williams, J. and Nicks, A.D. (1985) SWRRB, a simulator for water resources in rural basins: an overview. Proceedings of the Natural Resources Modeling Symposium, Pingree Park CO, 16–21 October 1983, USDA-ARS, ARS-30, pp. 17–22», presentado en Symposium, Pingree Park CO,
- [25] «Renard, K.G., Foster, G.R., Weesies, G.A. and Porter, J.P. (1991) RUSLE Revised Universal Soil Loss Equation. *Journal of Soil and Water Conservation*, 46, 30-33. - References - Scientific Research Publishing». Accedido: 16 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=1654361>
- [26] Sota Barrueta y Ruth Jahaira, «Modelamiento hidrológico para determinar la producción de sedimentos y zonas de erosión en la cuenca del río Mantaro», [repositorio@lamolina.edu.pe](mailto:repositorio@lamolina.edu.pe).

- Accedido: 1 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en:  
<https://repositorio.lamolina.edu.pe/items/f5b64b0e-6df0-458b-bfd4-67ad60f700cb>
- [27] R. Walton y H. Hunter, «Modelling water quality and nutrient fluxes in the Johnstone River Catchment, North Queensland.», presentado en 23rd Hydrology and Resources Symposium, Sydney, Australia, 1996.
- [28] «(PDF) Deploying environmental software using the Tarsier modelling framework», ResearchGate. Accedido: 26 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en:  
[https://www.researchgate.net/publication/242150650\\_Deploying\\_environmental\\_software\\_using\\_the\\_Tarsier\\_modelling\\_framework](https://www.researchgate.net/publication/242150650_Deploying_environmental_software_using_the_Tarsier_modelling_framework)
- [29] N. R. Viney y M. Sivapalan, «A conceptual model of sediment transport: application to the Avon River Basin in Western Australia», *Hydrol. Process.*, vol. 13, n.º 5, pp. 727-743, abr. 1999, doi: 10.1002/(SICI)1099-1085(19990415)13:5<727::AID-HYP776>3.0.CO;2-D.
- [30] «(PDF) ANSWERS: a model for watershed planning.», *ResearchGate*, doi: 10.13031/2013.34692.
- [31] «(PDF) Water Erosion Prediction Project (WEPP): Development History, Model Capabilities, and Future Enhancements», *ResearchGate*, doi: 10.13031/2013.23968.
- [32] D. Goodrich, «KINEROS: A kinematic runoff and erosion model: documentation and user manual», Accedido: 26 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en:  
[https://www.academia.edu/95559041/KINEROS\\_A\\_kinematic\\_runoff\\_and\\_erosion\\_model\\_documentation\\_and\\_user\\_manual](https://www.academia.edu/95559041/KINEROS_A_kinematic_runoff_and_erosion_model_documentation_and_user_manual)
- [33] «(PDF) Modeling watershed erosion with CASC2D», en *ResearchGate*. Accedido: 26 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en:  
[https://www.researchgate.net/publication/365537086\\_Modeling\\_watershed\\_erosion\\_with\\_CASC2D](https://www.researchgate.net/publication/365537086_Modeling_watershed_erosion_with_CASC2D)
- [34] H. Sun, P. S. Cornish, y T. M. Daniell, «Contour-based digital elevation modeling of watershed erosion and sedimentation: Erosion and sedimentation estimation tool (EROSSET)», *Water Resources Research*, vol. 38, n.º 11, pp. 15-1-15-10, 2002, doi: 10.1029/2001WR000960.
- [35] A. P. J. De Roo, C. G. Wesseling, y C. J. Ritsema, «Lisem: A Single-Event Physically Based Hydrological and Soil Erosion Model for Drainage Basins. I: Theory, Input and Output», *Hydrological Processes*, vol. 10, n.º 8, pp. 1107-1117, 1996, doi: 10.1002/(SICI)1099-1085(199608)10:8<1107::AID-HYP415>3.0.CO;2-4.
- [36] F. J. A. Schneider, «Modeling Sediment Yield on Hillslopes Under No-Till Farming», Universidad Federal de Santa María., Santa María. RS, 2021.
- [37] P. A. Basile, G. A. Riccardi, H. R. Stenta, y E. D. Zimmermann, «Modelo de simulación de procesos hidrosedimentológicos a escala de cuenca CTSS8-SEDMU», en *Modelación de procesos hidrológicos asociados al escurrimiento superficial en áreas de llanura*, Rosario: UTR Editora, 2008, pp. 216-233.
- [38] P. A. Basile, G. A. Riccardi, H. R. Stenta, y E. D. Zimmermann, «Modelo CTSS8-SED para simulación físicamente basada y espacialmente distribuida de procesos hidrológicos y erosión-sedimentación en cuencas de llanura2», en *Modelación de procesos hidrológicos asociados al escurrimiento superficial en áreas de llanura*, Rosario: UTR Editora, 2008, pp. 234-252.
- [39] M. A. Nearing, L. J. Lane, E. E. Alberts, y J. M. Laflen, «Prediction Technology for Soil Erosion by Water: Status and Research Needs», *Soil Science Soc of Amer J*, vol. 54, n.º 6, pp. 1702-1711, nov. 1990, doi: 10.2136/sssaj1990.03615995005400060033x.

- [40] J. M. Laflen, D. C. Flanagan, y B. A. Engel, «SOIL EROSION AND SEDIMENT YIELD PREDICTION ACCURACY USING WEPP», *JOURNAL OF THE AMERICAN WATER RESOURCES ASSOCIATION*, pp. 1-9, 2004.
- [41] GIPHES, «Laboratório de Pesquisa em Erosão e Hidrologia de Superfície», Laboratório de Pesquisa em Erosão e Hidrologia de Superfície. Accedido: 30 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.ufsm.br/laboratorios/lapehs/>
- [42] Daniel Ligier, Humerto Matteio, y Héctor Polo, «Erosión Hídrica potencial en la Provincia de Misiones», agrositio. Accedido: 1 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.agrositio.com.ar/noticia/38783-erosion-hidrica-potencial-en-la-provincia-de-misiones.html>
- [43] M. F. Navarro Rau, N. C. Calamari, y M. J. Mosciaro, «Dynamics of past forest cover changes and future scenarios with implications for soil degradation in Misiones rainforest, Argentina», *Journal for Nature Conservation*, vol. 73, p. 126391, jun. 2023, doi: 10.1016/j.jnc.2023.126391.