

En la Figura 1 se puede observar que el tema en referencia ha tenido relevancia en los últimos años (100 % de las publicaciones menor a 5 años).

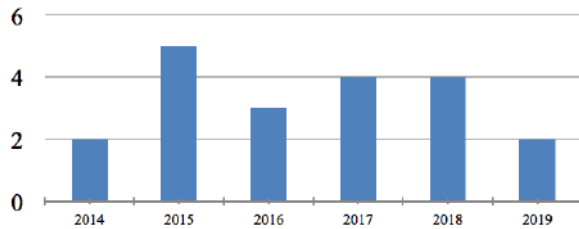


Fig. 1. Cantidad de artículos por año

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 2 se puede concluir que, frente a la temática, los países con mayor número de publicaciones son Brasil, Portugal y UK (45 % de los artículos).

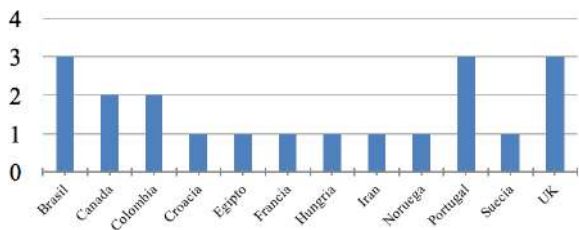


Fig. 2. Cantidad de artículos por país

Fuente: Elaboración propia.

¿Cuáles son los factores positivos que influyen en el funcionamiento de una *PMO*? (PI2). De acuerdo con la revisión, se establecieron los siguientes factores que influyen de manera positiva en el funcionamiento de una *PMO* (Figura 3): El apoyo a las decisiones de la alta dirección, la alta gestión de las comunicaciones y la aplicación metodológica de gestión de proyectos.

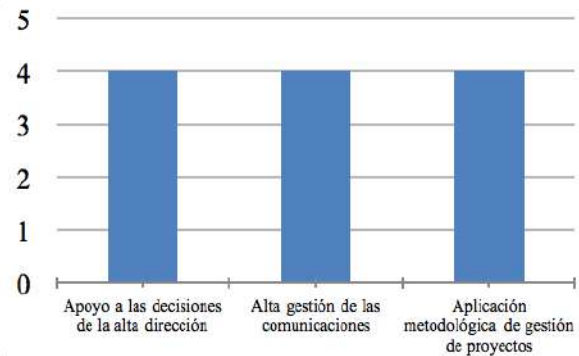


Fig. 3. Factores positivos en el funcionamiento de una *PMO*

Fuente: Elaboración propia.

¿Cuáles son los factores negativos que influyen en el funcionamiento de una *PMO*? (PI3). De acuerdo con la revisión, se establecieron los siguientes factores que influyen de manera negativa en el funcionamiento de una *PMO* (Figura 4): Dificil aplicación de la teoría a la práctica, poco entendimiento de una metodología de gestión de proyectos, y la complejidad e inconvenientes en los proyectos.

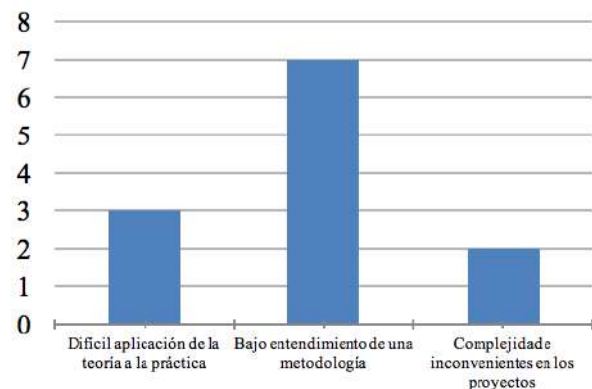


Fig. 4. Factores negativos en el funcionamiento de una *PMO*

Fuente: Elaboración propia.

IV. DISCUSIÓN

Para responder a la pregunta de investigación 2, acerca de los factores positivos que influyen en el funcionamiento de una PMO, se pueden analizar los siguientes:

Apoyo a las decisiones de la alta dirección: En esta categoría se agrupan los artículos 2, 4, 5 y 17, que hacen referencia a que un factor positivo es la medida en la que la PMO ayuda a la alta dirección a tomar decisiones y a obtener beneficios de la gestión de proyectos. Los roles y funciones de una PMO se definen de acuerdo con los objetivos estratégicos de la organización y, en general, deben cumplir con las expectativas de la gerencia superior y los gerentes de proyectos [10]. La gestión de beneficios le permite al patrocinador tener la información correcta para los estudios de viabilidad de inversión y muestra claramente el camino para la entrega de los beneficios esperados de la PMO [11].

Alta gestión de las comunicaciones: En esta categoría se agrupan los artículos 3, 6, 13 y 18, que hacen referencia a que la efectividad en las comunicaciones es otro factor de éxito dentro de la gestión de proyectos. El artículo 3 plantea que la comunicación con la alta gerencia de la compañía es continua y exitosa, lo que solo mejora la importancia del soporte de la alta gerencia y la comunicación general [5].

Aplicación metodológica de gestión de proyectos: En esta categoría se agrupan los artículos 3, 6, 8 y 15, que hacen referencia a que otro factor positivo está relacionado con que la PMO tiene más éxito siempre y cuando aplique una metodología y haga que la organización se apropie de ella. Los autores del artículo 6 afirman que una PMO define y mantiene procesos internos y administra proyectos y portafolios relacionados con procesos institucionales. Estos procesos se esfuerzan por introducir una economía de repetición en la ejecución de proyectos y reducir el riesgo del proyecto a través de la práctica común y el aseguramiento de la calidad [12]. A la vez que

en el artículo 8 se menciona que el crecimiento más reciente parece haber sido impulsado por el deseo de obtener un mejor control de los riesgos del proyecto, estandarizar el uso de metodologías, herramientas y técnicas de gestión de proyectos, mejorar el monitoreo del desempeño del proyecto y administrar y difundir el conocimiento de una gestión de proyectos sólida y práctica [2].

Para responder a la pregunta de investigación 3, acerca de los factores negativos que influyen en el funcionamiento de una PMO, se puede analizar lo siguiente:

Difícil aplicación de la teoría a la práctica: En esta categoría se agrupan los artículos 1, 19 y 20, que hacen referencia a que un factor negativo es que las metodologías de gestión de proyectos no necesariamente sirven para aplicarse textualmente o según la teoría en las empresas, por eso se deben analizar metodologías apropiadas para los proyectos TI. Según los autores del artículo 1, la investigación realizada entre empresas de diversas actividades económicas mostró que no es posible estandarizar una única metodología para todas ellas, sino que es necesario primero entender el ADN de cada organización para hacer la adaptación de una metodología que le corresponda, ya que existe una concepción equivocada acerca de la implementación de las metodologías de proyectos, al creer que pueden seguirse como un recetario [13]. De hecho, los roles y funciones de la PMO, aunque están estandarizados y claramente definidos en la literatura, varían en la práctica [14].

Poco entendimiento de una metodología de gestión de proyectos: En esta categoría se agrupan los artículos 7, 8, 11, 14, 16, 19 y 20, en ellos se refiere que otro factor negativo tiene que ver con que pocas empresas entienden el concepto o la teoría de una metodología de gestión por proyectos. Los autores del artículo 7 indican que, si bien las PMO ahora son una característica destacada de la gestión de proyectos organizativos, la lógica subyacente que conduce a su implementación o renovación aún no se comprende por completo

[6]. Los proyectos aún no alcanzan sus objetivos y todavía falta una cuantificación del impacto de las metodologías en el éxito del proyecto, lo que se evidencia más en los proyectos de TI por sus características particulares [15].

Complejidad e inconvenientes en los proyectos:

En esta categoría se agrupan los artículos 9 y 10, que hacen referencia a que otro factor negativo podría ser la alta complejidad de los proyectos y los inconvenientes que estos acarrear. Los autores afirman que los tipos y grados de complejidad y la fase del proyecto afectan la gestión del proyecto de diferentes maneras [4].

V. CONCLUSIONES

Uno de los propósitos fue lograr que la mayoría de artículos seleccionados en la revisión bibliográfica fueran publicaciones recientes, lo que permite afirmar que en el artículo se trató una temática actual y vigente. Adicionalmente, se evidenció que los países con más publicaciones al respecto fueron Brasil, Portugal y Canadá, y se encontró también mucha diversidad en los países de origen de las publicaciones, lo que indica que es un tema de interés mundial.

Y, finalmente, para el funcionamiento de una PMO, los factores positivos encontrados fueron: el apoyo a las decisiones de la alta dirección, la alta gestión de las comunicaciones y la aplicación metodológica de gestión de proyectos; los factores negativos encontrados fueron: difícil aplicación de la teoría a la práctica, poco entendimiento de una metodología de gestión de proyectos por parte de las organizaciones y la complejidad y los inconvenientes en los proyectos.

Estos factores identificados permiten ser el punto de partida para definir los que se deben tener en cuenta en la implementación de las PMO en empresas de TI, de manera que se puedan mitigar los factores asociados a la incertidumbre, los frecuentes cambios y la alta complejidad de los proyectos de TI. Un trabajo futuro es incluir investigaciones

que profundicen en impactos de las PMO en las empresas de TI, de acuerdo con necesidades por resolver, tales como métricas, estructuración y conceptos más específicos de esta industria.

REFERENCIAS

- [1] S. Paton & B. Andrew, "Project Management Office (PMO) in product lifecycle management: A case study in the defence industry". *Int. J. Prod. Econ.*, N.º 208, pp. 43-52, September 2016. <https://doi.org/10.1016/J.IJPE.2018.11.002>
- [2] A. Monteiro, V. Santos, & J. Varajão, "Project Management Office models - A review", *Procedia Comp. Sci.*, N.º 100, pp. 1085-1094, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2016.09.254>
- [3] J. Gomes, & M. Romão, "Improving Project Success: A case study using Benefits and Project Management", *Procedia Comp. Sci.*, N.º 100, pp. 489-497, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2016.09.187>
- [4] G. Widforss, & M. Rosqvist, "The Project Office as Project Management Support in Complex Environments", *Procedia Comp. Sci.*, N.º 64, pp. 764-770, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.08.626>
- [5] G. Blažević, S. Mišić, & M. Šimac, Importance of Managing PMO in Croatian PM Market. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, N.º 119, pp. 949-956, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2014.03.106>
- [6] V. Santos, & J. Varajão, PMO as a Key Ingredient of Public Sector Projects' Success - Position Paper. *Procedia Comp. Sci.*, N.º 64, pp. 1190-1199, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.08.546>
- [7] H. Taylor, J. P., Woelfer, & E. "Artman, Information Technology Governance in Practice: A Project Management Office's Use of Early Risk Assessment as a Relational

- Mechanism”, *Int. J. Inf. Technol. Proj. Manage.*, vol. 3, N.º 3, pp. 14-30, 2012. <https://doi.org/10.4018/jitpm.2012070102>
- [8] F. B. Lopez, “Information Technology Project Management Office: Exploring the reasons influencing the adoption of IT PMOs for organizational success”, *ProQuest Dissertations and Theses*, N.º 168, 2016. Disponible en: https://library.capella.edu/login?url=http://search.proquest.com/docview/1809109612?accountid=27965%5Cnhttp://wv91q51d3p.search.serialssolution.com?ctx_ver=Z39.88-2004&ctx_enc=info:ofi/enc:UTF-8&rft_id=info:sid/ProQuest+Dissertations+%26+Theses+Global&rft
- [9] L. D. Siqueira, & S. F. Crispim, “Alinhamento dos projetos de TI aos modelos de negócio das organizações”, *Gestao e Producao*, vol. 21, N.º 3, pp. 621-634, 2014. <https://doi.org/10.1590/0104-530X294>
- [10] T. G. A. Viglioni, J. A. O. G., Cunha, & H. P. Moura, “A Performance Evaluation Model for Project Management Office Based on a Multicriteria Approach”, *Procedia Comp. Sci.*, N.º 100, pp. 955-962, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2016.09.257>
- [11] S. Paton, & B. Andrew, “The role of the Project Management Institute”, en *PMBOK Guide Sixth Edition*, 2017.
- [12] I. Szalay, Á. Kovács, & Z. Sebestyén, “Integrated Framework for Project Management Office Evaluation”, *Procedia Eng.*, N.º 196, pp. 578-584, jun. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.08.033>
- [13] C. M. Betancur, I., Pinzón, y J. S. Posada, “Experiencias de implementación de PMO en empresas de la ciudad de Medellín”, *Rev. EIA. Esc. Ing. Antioq.*, N.º 21, ene.-jun. 2014.
- [14] C. S., Oliveira, A. Tereso, & G. Fernandes, “PMO Conceptualization for Engineering and Construction Businesses”, *Procedia Comp. Sci.*, N.º 121, pp. 592-599, 2017.
- [15] A. Lacruz, & E. Cunha, “Project management office in non-governmental organizations: an *ex post facto* study”, *Revista de Gestão*, vol. 25, N.º 2, pp. 212-227, 2018. <https://doi.org/10.1108/REGE-03-2018-033>

Capítulo X

Estimación de Precipitación y Evapotranspiración Utilizando Sistemas de Información Geográfica a partir de Datos Obtenidos en Estaciones Meteorológicas Ubicadas en la Cuenca del Río Negro

Mauricio Escobar Tobón - mauricio_escobar54181@elpoli.edu.co

Sandra Patricia Mateus - spmateus@elpoli.edu.co

Juan Carlos Valdés - jcvaldes@elpoli.edu.co

Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid, Medellín, Colombia

I. INTRODUCCIÓN

Conocer el comportamiento hidrológico de una región, especialmente el asociado a la lluvia, permite empezar a entender fenómenos de crecientes que pueden estar fuera de lo normal, también ayuda al entendimiento de los efectos erosivos de la lluvia y las escorrentías [1].

Para la realización de estos procesos se hace necesario la utilización de herramientas que agilicen el análisis y ayuden a la actualización de la información. Es aquí donde los Sistemas de Información Geográfica (SIG) toman importancia, porque su mayor fortaleza es la gran capacidad de trabajar con bases de datos, lo cual la convierte en una herramienta especializada para el análisis y la mapeación de la información hidrológica. Además, en la actualidad, se cuenta con gran cantidad y calidad de información con respecto a variables como, precipitación, temperatura, evapotranspiración, entre otras, esto, unido con las fortalezas de los SIG, crea un escenario propicio de estudio del comportamiento hidrológico de un sitio de interés [2].

Por eso en este artículo se utilizan las herramientas de los SIG para realizar la delimitación de la cuenca del río Negro, a partir de las curvas de nivel obtenidas de estudios realizados por la Corporación Ambiental de las Cuencas de los ríos

Negro y Nare (Cornare). Se hicieron análisis de precipitación, evapotranspiración y temperatura, tomando los datos de las estaciones climatológicas del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam) junto con las herramientas de análisis y manejo de datos de los SIG y se presentan los mapas con la información procesada y analizada.

El artículo se estructura de la siguiente forma: en la sesión 2 se presenta el área de estudio; en la sesión 3 se describe la metodología; en la sesión 4 se plantean los resultados, y, por último, se encuentran las conclusiones.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

A. Ciclo hidrológico

La evaluación de los recursos hídricos requiere una correcta estimación del balance hidrológico o de la repartición de la precipitación entre evapotranspiración, escorrentía y recarga de acuíferos.

La ecuación de balance hidrológico es la ley más importante en Hidrología, y aunque su expresión es muy simple, la cuantificación de sus términos es normalmente complicada, debido a la falta de medidas directas y a la variación espacial de la evapotranspiración, de las pérdidas profundas y de los cambios del agua almacenada en una cuenca [3].

Para solucionar estas dificultades, generalmente se admiten dos supuestos: el primero es que la cuenca es impermeable, por tal motivo las pérdidas profundas son despreciables; y el segundo admite que las variaciones del agua almacenada en la cuenca son despreciables para un período suficientemente largo; con estos supuestos se logra realizar un acercamiento al balance hidrológico.

Variables involucradas en el estudio del ciclo hidrológico: La descripción del ciclo hidrológico se resume en el estudio de las precipitaciones y la evapotranspiración, ya que en respuesta a la complejidad de la medida de las recargas de los acuíferos se toma la cuenca como impermeable.

Precipitación: De acuerdo con la definición clásica de la Hidrología, la precipitación son los procesos mediante los cuales la lluvia cae a la superficie terrestre, lo que incluye la lluvia, la nieve y otros procesos tales como granizo y nevisca [4]. En nuestro contexto, la precipitación se refiere preferiblemente a la lluvia como el tipo más común que se presenta, con algunas eventualidades en las que se dan lluvias con granizo. Esta variable atmosférica, que en gran parte describe el tiempo atmosférico en nuestro país, exhibe una alta variabilidad espacial y temporal propia de procesos altamente caóticos y no lineales. La ubicación geográfica de Colombia, en medio de los dos océanos, a una latitud cercana al Ecuador y con unas condiciones topográficas tan variables, hace que los patrones de precipitación sean difíciles de identificar y por lo tanto requieren un estudio detallado.

Evapotranspiración: “El concepto de evapotranspiración fue introducido por primera vez por Charles Thornthwaite (Thornthwaite, 1948), quien la definió como la máxima cantidad de agua que puede evaporarse desde un suelo completamente cubierto de vegetación, que se desarrolla en óptimas condiciones, y en el supuesto caso de no existir limitaciones en la disponibilidad de agua” [5].

Para medir la evapotranspiración se utilizan estaciones especialmente diseñadas para esta variable llamadas lisímetros (ver Figura 1), debido a la complejidad en la estructuración de estas estaciones se utilizan fórmulas que dependen de otras variables meteorológicas un poco más fáciles de medir. Algunas de estas fórmulas se pueden observar en la Tabla 1.

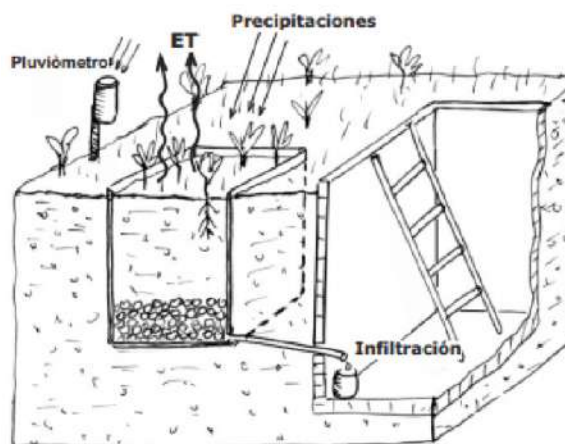


Fig. 1. Estación de medición de evapotranspiración (lisímetro)

Fuente: Tomado de [6]

Tabla 1. Ecuaciones de cálculo de evapotranspiración

Método	Medidas necesarias	Otros datos necesarios
Thornthwaite	Temperatura	De la latitud por una tabla se obtiene el número teórico de horas de sol.
Jensen-Heise	Temperaturas (medias, máximas y mínimas del mes más cálido), altitud y radiación solar.	Tablas de número teórico de horas de sol y la radiación solar se puede estimar.
Hargreaves	Temperatura y radiación solar	La radiación solar se puede estimar con temperaturas máximas y mínimas diarias.

Método	Medidas necesarias	Otros datos necesarios
Blanney-Criddle	Temperatura	Tablas de número teóricos de horas de sol y coeficiente que depende del tipo de cultivo que se encuentre en la cobertura vegetal.
Turc	Temperatura, y horas reales de sol	De las horas de sol se obtiene la radiación global incidente (cal/cm ² .día) con una fórmula.
Penman	Temperatura, horas reales de sol, velocidad del viento y humedad relativa	Por tablas se obtienen otros parámetros necesarios.

Fuente: Elaboración propia.

Temperatura: En meteorología, la temperatura se registra en las estaciones meteorológicas, de las que existen miles en todo el mundo. En estas estaciones se miden, por ejemplo, datos de temperatura a horas fijas, valores de temperaturas máximas y mínimas o se toman registros continuos en el tiempo, llamados termogramas.

Para analizar la distribución de la temperatura sobre grandes áreas se usan las isotermas, que son curvas dibujadas sobre un mapa que unen los puntos de igual temperatura. El cambio de temperatura en una dirección determinada del espacio, se llama gradiente de temperatura y se puede obtener del mapa de isotermas. Al analizar los gradientes de temperatura en los mapas, se puede deducir que donde las isotermas están más juntas, el cambio de temperatura en la región considerada es grande, es decir, el gradiente de temperatura es grande, y donde están más separadas, el cambio o gradiente es pequeño [7].

B. Redes meteorológicas

Una red de estaciones constituye un sistema articulado de medición, almacenamiento, envío y análisis de información relacionada con diferentes variables meteorológicas. Dicho sistema debe tener como objetivo fundamental el estudio de un fenómeno dado. En el caso que aquí atañe, se pretende recolectar y analizar información referida a las variables que con mayor claridad influyen en la estimación del ciclo hidrológico.

Componentes de una red de estaciones meteorológicas: La red meteorológica en su estructura considera elementos de medición, de almacenamiento de datos, de transmisión de datos y de interpretación de datos.

Estaciones: Los principales elementos que integran una red meteorológica son las estaciones. Una estación debe contener dispositivos que permitan medir, entre otras variables, presión barométrica, evapotranspiración, temperatura, humedad, precipitación, humedad del suelo, radiación solar, radiación ultravioleta, y velocidad y dirección del viento. Aparte de los sensores encargados de registrar una señal análoga referida a la medición de la variable en cuestión, las estaciones poseen una unidad central que transforma las señales análogas en digitales. Dicha unidad suele recibir el nombre de Unidad Inteligente de Procesamiento, y cuenta, además, con mecanismos sistematizados que permiten tomar decisiones en función de las condiciones actuales [8].

III. ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio seleccionada para este trabajo de investigación es la cuenca del río Negro en el Oriente antioqueño. El área de la cuenca se encuentra en jurisdicción de Cornare. Geográfica y topográficamente, el área de la cuenca del río Negro está localizada en la vertiente oriental de la Cordillera Central.

En la Figura 2, se presenta la delimitación de la cuenca [9], la cual es, por definición, la porción de terreno que drena al punto de cierre en la entrada del río Negro al embalse Peñol-Guatapé. La delimitación de la cuenca ha sido definida mediante las direcciones de flujo y la acumulación de flujo, en un proceso basado en el uso de un sistema de información geográfica, este procedimiento es definido en [10], a partir del DEM obtenido de estudios realizados por Cornare en la zona de estudio, donde luego de corregir vacíos se logró obtener los mapas de dirección de flujo, flujos acumulados y, por último, la delimitación de la cuenca [10].

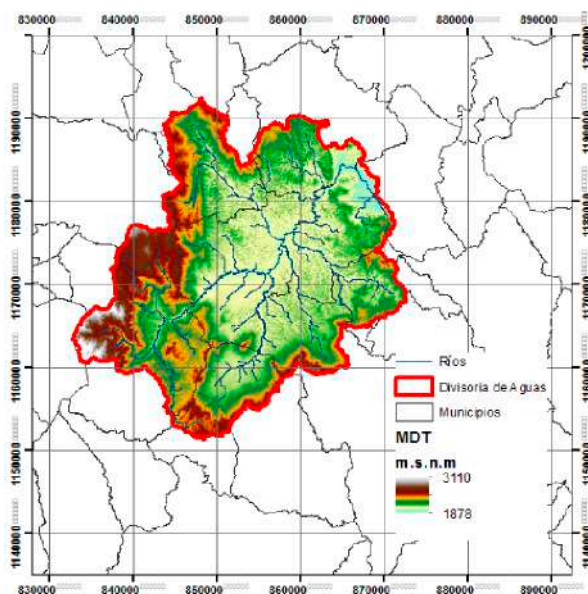


Fig. 2. Delimitación de la cuenca del río Negro

La cuenca del río Negro la conforman 219 veredas que se encuentran repartidas en diez municipios de la subregión del Oriente antioqueño: Rionegro, Marinilla, Santuario, San Vicente, El Retiro, El Peñol, Envigado, El Carmen de Viboral, Guarne y La Ceja del Tambo [9].

IV. METODOLOGÍA PARA EL PROCESAMIENTO DE LOS DATOS

Para la delimitación del área de estudio, se utilizaron los métodos y procesos que pueden

emplearse en la tarea de levantamiento y arreglo de los geodatos, y procesos de geomodelación ligados a la construcción de modelos espaciales con propósitos hidrológicos a partir de la cartografía disponible en estudios previos elaborados en el área de estudio por Cornare. Para el análisis de los datos espaciales se utilizó la herramienta de ESRI ArcGIS 10.6, con la cual se desplegaron los datos para las respectivas simulaciones y la utilización de herramientas específicas como Geostatistical Analyst and Spatial Analyst.

En el proceso de la delimitación de la cuenca, se toman las curvas de nivel encontradas en estudios realizados por Cornare para la cuenca del río Negro, donde se ejecutaron algunos ajustes, como la corrección en los vacíos de información resultantes en los Modelos Digitales de Superficie (*Digital Surface Model –DSM–*).

En este sentido, en [10] se propuso un método para la corrección de la cartografía, con el objetivo de lograr una representación actualizada de los elementos hidrológicos de superficie realmente significativos que permiten construir una condición de frontera. Por eso, para la delimitación del área de estudio se tomó el DSM de los estudios de Cornare y se utilizó el método de corrección de vacíos ya expuesto [11].

En busca de la actualización de la información física, se determinaron diferentes metodologías en función de la variable de interés, como delimitación de la cuenca, precipitación y evapotranspiración.

Análisis de precipitación: Los datos de precipitación se analizaron mediante procesos estadísticos (tendencia central y variabilidad) y técnicas geoestadísticas [12]. La calidad de la estimación de la precipitación está sujeta a la calidad, cantidad y distribución de los datos de precipitación disponibles en la zona de estudio. La incertidumbre asociada con la estimación va a aumentar en la medida en que la cantidad de datos de precipitación disponible sea baja.

Para determinar la variabilidad en las precipitaciones en el área de trabajo, se tomaron las diferentes estaciones de las cuales se tiene información (ver Tabla 2).

Tabla 2. Estaciones pluviométricas utilizadas en el análisis de precipitación

Nombre	Coordenadas		Cota	Fuente
	Latitud	Longitud		
Tulio Ospina	6,319694	-75,55325	1438	Ideam
Campoalegre	6,073778	-75,335611	1850	Ideam
La Unión	5,998333	-75,381389	2530	Ideam
Santuario	6,133056	-75,273583	1250	Ideam
La Salada	6,048361	-75,624667	1923	Ideam
A. J. M. Córdova	6,168667	-75,425917	2157	Ideam
La Cuchilla	6,368333	-75,453611	1600	Ideam
Corrientes	6,311944	-75,253556	1965	Ideam
El Peñol	6,214222	-75,241306	2047	Ideam
Montebello	5,950833	-75,536833	560	Ideam
La Selva Autom	6,131917	-75,414556	2125	Ideam
Sta. Helena	6,196889	-75,51675	2550	Ideam

Fuente: Elaboración propia.

La selección de las estaciones se realiza utilizando los polígonos de Thiessen, los cuales consisten en la delimitación de áreas de influencia a partir de un conjunto de puntos; el tamaño de éstos y la configuración dependen de la distribución de los puntos originales de las estaciones que se van a utilizar (ver Figura 3).

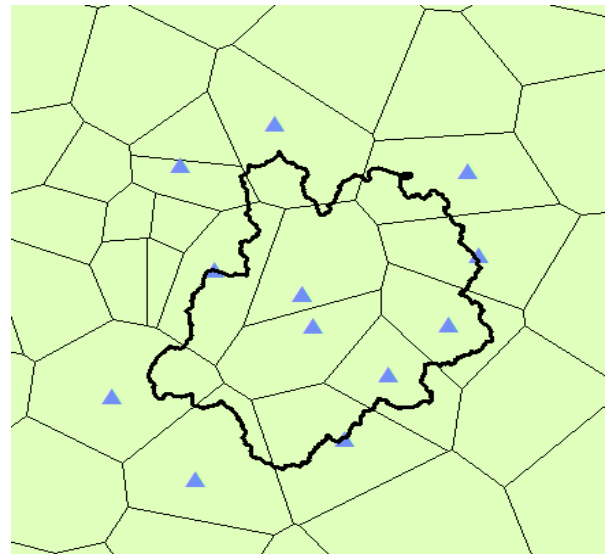


Fig. 3. Polígonos de Thiessen de interés para el área de trabajo

En total se tomaron los datos de 12 estaciones en un periodo de 20 años, comprendidos entre 1998 y 2017. En la Tabla 2 se presentan las estaciones utilizadas, así como su ubicación y la fuente de información.

Análisis de evapotranspiración: La evapotranspiración (ET) como variable hidrológica a nivel territorial, es primordial para cualquier tipo de análisis concerniente con el manejo del agua (gestión de cuencas hidrográficas, embalses locales, entre otras) [13].

Para el estudio de la ET, se tomaron los datos de tres estaciones suministradas por el Ideam las cuales se detallan en la Tabla 3. Luego de obtener los datos se realizó una interpolación de distancia inversa ponderada (*Inverse Distance Weighted – IDW*–).

Tabla 3. Estaciones de evapotranspiración

Nombre	Coordenadas		Cota	Fuente
	Latitud	Longitud		
La Salada	6,048361	-75,624667	1923	IDEAM
Corrientes	6,311944	-75,253556	1965	IDEAM
La Selva Autom	6,131917	-75,414556	2125	IDEAM

Fuente: Elaboración propia.

Luego de procesar la información se obtienen los mapas de precipitación y evapotranspiración anuales de la cuenca del río Negro, desde el año 1998 al 2017, para el caso de precipitación, y de 1994 al 2003, para la evapotranspiración, los cuales se visualizan en la sección de resultados.

Análisis estadístico de los datos obtenidos:

Los datos de las estaciones seleccionadas para el análisis de evapotranspiración y precipitación son descargados directamente de la página del portal de información del Ideam, en dichas series faltan algunos datos, lo cual se corrigió utilizando el método de Criterio de Valor Medio, que consiste en sustituir la carencia de un registro por el valor medio de la serie [14]. En la Tabla 4 se presentan los datos de precipitación ya completados para los años comprendidos entre 1998 y 2003.

Tabla 4. Datos de precipitación de 1998 a 2003

Nombre Estación	Precipitación Anual					
	1998	1999	2000	2001	2002	2003
Tulio Ospina [27015090]	4491,4	5720,6	4573,4	1962,8	2417,9	2263,4
Campoalegre [23080650]	2983,8	3408,0	3693,0	1905,9	2490,2	2465,6
La Unión [26180170]	2010,0	3085,6	2876,0	2008,5	1970,5	1560,5
Santuario [23080920]	2500,1	3147,9	3254,4	2580,1	2382,4	2711,8
La Salada [27015260]	2661,5	3418,6	3125,3	2065,0	2132,9	2592,2

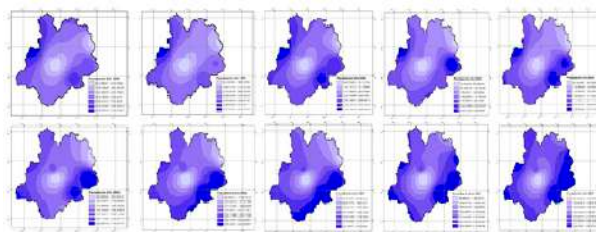
	Precipitación Anual					
A. J. M. Córdoba [23085200]	1928,3	2536,0	2470,8	1638,9	1594,6	1931,7
La Cuchilla [27010820]	2020,3	2230,9	2466,7	1367,9	1555,6	1928,2
Corrientes [23085160]	3150,0	2527,7	2646,7	943,9	931,6	1360,1
El Peñol [23085110]	406,0	702,5	797,5	562,8	605,1	484,8
Montebello [26180200]	2088,5	3481,6	2629,9	1834,1	2246,3	2551,9
La Selva Autom [23085260]	222,7	202,2	445,1	310,9	481,1	669,0

Fuente: Elaboración propia.

V. RESULTADOS

En el procesamiento de la información de precipitación se cuenta con una mayor cantidad de datos, lo que ofrece mayor confianza en los resultados obtenidos. En el análisis de evapotranspiración solo se cuenta con cuatro estaciones, lo que podría incurrir en algunos vacíos de información o en la reducción de su calidad. A continuación, se muestran los resultados para cada uno de los análisis realizados.

Precipitación: Después de haber hecho el análisis de las 12 estaciones pluviométricas y una interpolación de distancia inversa ponderada (IDW), se llega a los siguientes mapas de precipitaciones anuales en el área de estudio. Las unidades de medida están dadas en mm de lluvia.

**Fig 4.** Precipitación entre los años 1998-2007

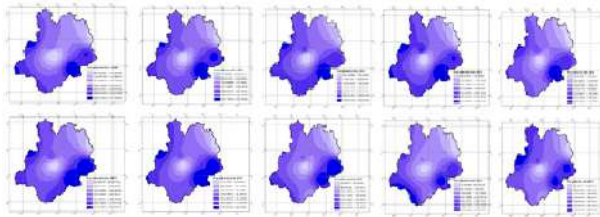


Fig. 5. Precipitación entre los años 2007-2017

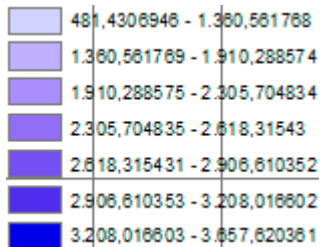


Fig. 6. Escala de variación de la precipitación

Evapotranspiración: Para la realización del análisis de evapotranspiración en la cuenca del río Negro se utilizan las tres estaciones con las que se cuenta. Después de realizada la interpolación de distancia inversa ponderada (IDW), se llega a los siguientes mapas de evapotranspiración anuales en el área de estudio. Las unidades de medida están dadas en mm.

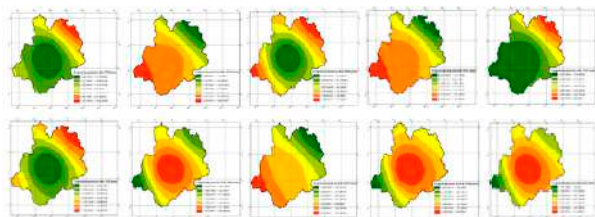


Fig. 7. Evapotranspiración entre los años 1994-2003

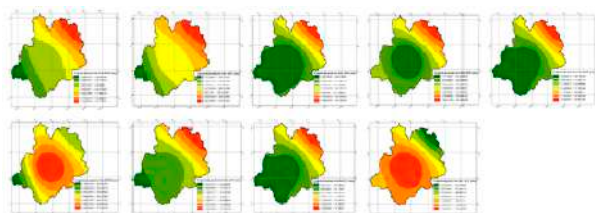


Fig. 8. Evapotranspiración entre los años 2003-2012

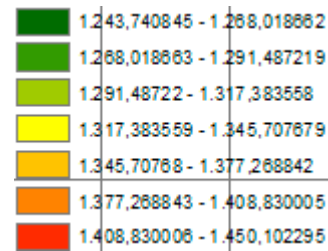


Fig. 9. Escala de variación de la evapotranspiración

Luego de realizar el análisis de las evapotranspiraciones desde el año 1994 hasta el año 2012, para un total de 19 años en la cuenca del río Negro, se llega a una evapotranspiración media la cual se puede visualizar en la Figura 8.

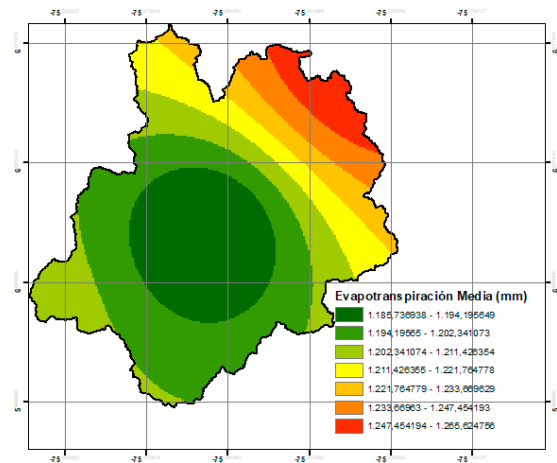


Fig. 10. Evapotranspiración media anual (mm)

Los valores de la evapotranspiración media oscilan entre 1185,73 mm y 1265,42 mm anuales.

Temperatura: Al momento de realizar el análisis de temperaturas para la cuenca del río Negro se llega a un obstáculo: la falta de estaciones de temperatura en el área de la cuenca. Por tal motivo se procedió a utilizar el método expuesto en [15], el cual aporta las fórmulas de temperatura media, máxima y mínima para las diferentes regiones de Colombia, dependiendo de la altura con respecto al mar. En el caso de la cuenca del río Negro, se utilizan las propuestas para la región Andina, donde se tienen las siguientes ecuaciones:

$$T_m = 29,42 - 0,0061 A$$

$$T_{max} = 33,97 - 0,0058 A$$

$$T_{min} = 23,97 - 0,0059 A$$

Donde:

T_m : Temperatura media

T_{max} : Temperatura máxima

T_{min} : Temperatura mínima

A: Altura con respecto al nivel del mar

Para la utilización de estas fórmulas se emplean las curvas de nivel, seguidamente, por medio del software ArcGis, se hace el cálculo de temperatura media, máxima y mínima con cada una de las curvas de nivel, para luego realizar una interpolación triangular (*Triangulated Interpolation - TIN-*) y así poder obtener un modelo del comportamiento de la temperatura en la cuenca. En las Figuras 9, 10 y 11 se puede visualizar cómo es el debido comportamiento de las temperaturas en la cuenca [16].

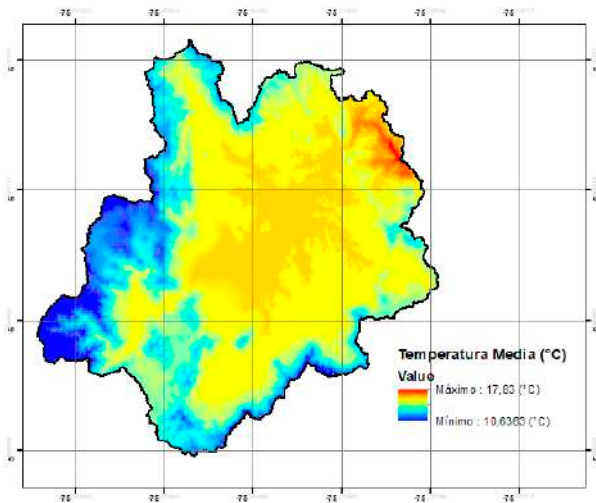


Fig. 11. Mapa de temperatura media (°C)

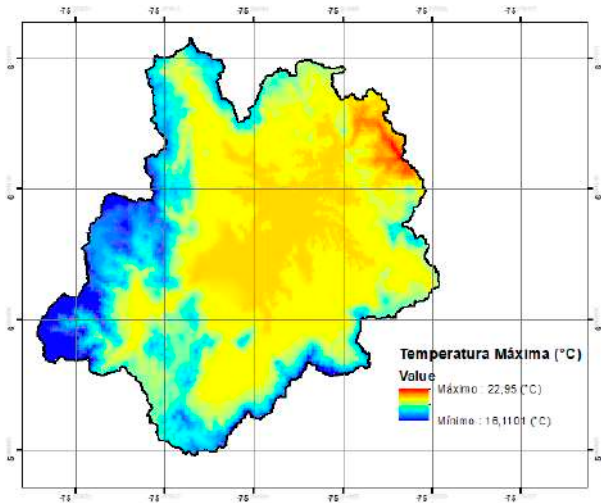


Fig. 12. Mapa de temperatura máxima (°C).

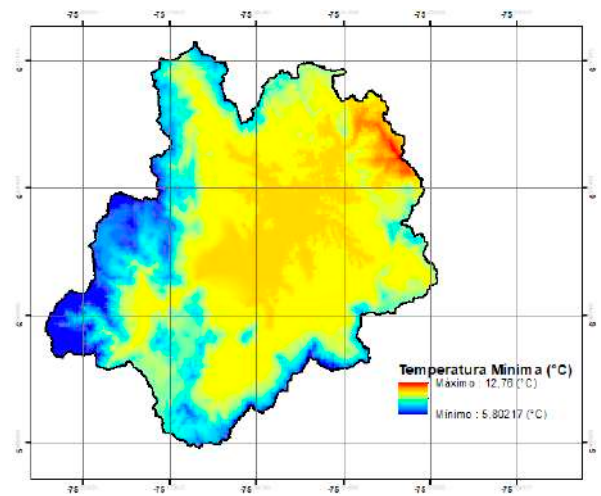


Fig. 13. Mapa de temperatura mínima (°C).

VI. DISCUSIÓN

Luego de obtener los valores teóricos y prácticos (por medio de las estaciones) de la evapotranspiración, estos pueden ser comparados con los valores de referencia obtenidos por [17].

La caracterización física de la cuenca del río Negro proveerá información para mejorar la fase de entrenamiento de la red neuronal que se utilice para la construcción del modelo predictivo de nivel del río Negro.

Para llevar a cabo las calibraciones o correcciones de los datos de evapotranspiración, se calcula el caudal del río Negro haciendo uso de los mapas de precipitación y evapotranspiración por el método del balance a largo plazo, y luego se compara con el caudal medio multianual extraído de los datos de una estación de caudal que se encuentre sobre el río Negro.

VII. CONCLUSIONES

La cantidad de estaciones que se cuentan para el análisis de la precipitación ofrece una buena distribución de los datos dentro de la cuenca del río Negro. La caracterización física de la cuenca permitirá realizar un mejor entrenamiento del modelo predictivo de nivel del río Negro.

Para determinar la calidad de la información procesada con respecto a la evapotranspiración, es necesario realizar una comparación con métodos basados en datos de temperatura y altitud, debido a la poca cantidad de estaciones con las que se cuenta para esta variable.

REFERENCIAS

- [1] A. Viera Brones, A., López Santos, J. L. González Barrios, & R. Trucios Caciono, “Caracterización de la cuenca Alip con la ayuda de un sistema de información geográfica”, *Revista Chapingo Serie Aridas*, XI, 23-34, 2012.
- [2] F. Amiri, “Estimate of erosion and sedimentation in semi-arid basin using empirical models of erosion potential within a Geographic Information System”, *Air, Soil and Water Research*, 2010. <https://doi.org/10.4137/ASWR.S3427>
- [3] P. Llorens, “La evaluación y modelización del balance hidrológico a escala de cuenca”, *Ecosistemas*, 1, 2003. Disponible en: <http://www.aeet.org/ecosistemas/031/opinion1.htm>
- [4] V. T. Chow, D. R. Maidment, y L. W. Mays, *Hidrología aplicada*, Bogotá: McGraw Hill, 1994.
- [5] J. A. Gómez y M. C. Cadena, “Validación de las fórmulas de evapotranspiración de referencia (ET_o) para Colombia”, Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam), Subdirección de Meteorología, 2017.
- [6] F. J. Sánchez San Román, “Evapotranspiración”, Departamento de Geología, Universidad de Salamanca, 2000. Disponible en: <http://hidrologia.usal.es/temas/Evapotransp.pdf>.
- [7] J. Inzunza, *Meteorología Descriptiva y aplicaciones en Chile*, Universidad de Concepción, 2003. Disponible en: http://nimbus.com.uy/weather/Cursos/Curso_2006/Textos%20complementarios/Meteorologia%20descriptiva_Inzunza/cap1_Inzunza_La%20atmosfera.pdf
- [8] G. A. Martínez López, “Meteorological Station for forming networks”, *Installation Process*, vol. 21, N.º 1, pp. 115-121, 2016.
- [9] Consorcio POMCAS Oriente Antioqueño, Formulación del plan de ordenación y manejo de la cuenca hidrográfica de río Negro. Documento introductorio del POMCA río Negro, 2016.
- [10] E. Pérez, C. Castro, Y. Castrillón, G. Valencia y J. Valdés, Comps., *Geoinformática Aplicada con aprendizaje basado en problemas*. Medellín: Instituto Antioqueño de Investigación, 2017.
- [11] Ó. Quintero y G. Valencia, “Corrección de vacíos de información (voids) a partir de la aplicación de promedios de diferencias de altura entre superficies de elevación”, en *Geoinformática Aplicada con aprendizaje basado en problemas*, E. Pérez, C. Castro, Y. Castrillón, G. Valencia y J. Valdés, Comps. Medellín: Instituto Antioqueño de Investigación, 2017, pp. 62-77.

- [12] R. Giraldo Henao, *Introducción a la geoestadística: Teoría y aplicación*, Bogotá: Universidad Nacional de Colombia, 2011.
- [13] P. J. Pérez y F. Castellví, “Análisis de la evapotranspiración a escala local y regional en Cataluña”, *Ingeniería del Agua*, vol. 9, pp. 59-72, 2002.
- [14] R. Rodríguez, M. C. Llasat y J. Martín-Vide, *Análisis de Series Temporales en Climatología: modelización y homogeneidad*. Barcelona: Ediciones de la Universitat de Barcelona, Textos Docentes N.º 165, 2000.
- [15] B. Chaves Córdoba y A. Jaramillo Robledo, “Regionalización de la temperatura del aire en Colombia”, *Cenicafé*, N.º 49, 224-230, 1998.
- [16] J. F. Escobar, T. Betancur y J. C. Valdés, “Herramientas SIG para la reconstrucción paleotopográfica de un ambiente sedimentario”, *Geotecnologías, Herramientas para la construcción de una nueva visión del cambio global y su transformación para un futuro sostenible*, N.º XVII, pp. 2241-2254, 2016.
- [17] A. Jaramillo, “Evapotranspiración de referencia en la región Andina de Colombia”, *Cenicafé*, vol. 57, N.º 4, pp. 288-298, 2006.

Capítulo XI

Plataformas de Sensores Remotos en la Generación de Cartografía como Instrumento de Apoyo a la Gestión de Ecosistemas Estratégicos

John Escobar - john.escobar@udea.edu.co

Alexandra Urán - alexandra.uran@udea.edu.co

Universidad de Antioquia, , Medellín, Colombia

Vanesa Paredes - contactenos@corpouraba.gov.co

Corpouraba

Juan Carlos Valdés - jcvaldes@elpoli.edu.co

Juan Parra - jcparra@elpoli.edu.co

Esteban Zapata - eszatre@gmail.com

Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid, , Medellín, Colombia

I. INTRODUCCIÓN

En Colombia, los ecosistemas estratégicos han adquirido una significativa importancia en los últimos años, no sólo en términos de investigación científica, sino también de cambios jurídicos y políticos en su manejo. Es así como desde inicios de la década de 2010 se han adelantado estudios interdisciplinarios sobre ecosistemas de páramo, con el fin de caracterizarlos ecológica, geográfica y socioculturalmente. Producto de estos esfuerzos, en el año 2016 se consolidó la política de delimitación de páramos, la cual se convirtió en un elemento determinante para la legislación sobre explotación minera y producción agropecuaria en áreas de páramo. Los resultados se consignan en una serie de resoluciones, entre las que se resalta la Resolución 0496 del 22 de marzo de 2016, que delimita el complejo “Páramos del Sol – Las Alegrías”, con una extensión de 15.396 hectáreas, en jurisdicción de 11 municipios ubicados en los departamentos de Antioquia y Chocó, Colombia [1]. Los ecosistemas de páramos cobran gran relevancia por ser sistemas naturales singulares en cuanto a características biológicas, climáticas y de suelo [2]. Sin embargo, investigaciones recientes los han identificado como sectores con una alta vulnerabilidad por los efectos del cambio climático [3], el avance de la frontera agrícola [4] y la minería [5].

En enero de 2018, el grupo de investigación Medio Ambiente y Sociedad (MASO), acompañado por el Grupo de Ingeniería y Gestión Ambiental (GIGA), elaboraron una propuesta para desarrollar el proyecto “Construcción de una Herramienta de Planificación, Ordenamiento y Manejo del Complejo de Páramos Frontino-Urrao, Antioquia”, mediante convenio entre la Universidad de Antioquia y la Corporación para el Desarrollo Sostenible del Urabá (Corpourabá), labor en la cual se desarrolla una batería de instrumentos en los que convergen las redes de Actores, Factores y Sectores (FAS), las metodologías de Presión, Estado, Respuesta (PER) y la cartografía de actores sociales (MAC), apoyados en los sistemas de información geográfica (SIG) y los sensores remotos, como un aporte significativo a la gestión sostenible de estos ecosistemas y cuyos avances se presentan a continuación.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

Uno de los enfoques de la sostenibilidad, denominada fuerte, plantea que esta debe preocuparse directamente por la salud de los ecosistemas en los que se inserta la vida y la economía de los seres humanos sin ignorar la incidencia que sobre los procesos del mundo físico tiene el razonamiento monetario [6]. Enmarcado en este concepto se encuentra el Capital Natural

Crítico (CNC), el cual puede entenderse como el conjunto de recursos medioambientales que, a una escala geográfica dada, asegura las funciones medioambientales importantes para las cuales no existe ningún sustituto en términos de capital manufacturado o humano [7]. Pero la instrumentación de este concepto conduce a la siguiente pregunta: ¿cómo identificar y evaluar estas funciones en una región y a una escala determinada? En este sentido, en [8] se propone un modelo para la identificación del CNC con apoyo en herramientas de manejo de información y análisis geoespacial. Escobar y Lopera [9] retoman esta propuesta y sugieren una formulación soportada en modelos presión-estado-respuesta (PER) espacialmente explícitos, elaborados con el apoyo de los sistemas de información geográfica (SIG) e información proveniente de cartografía temática y sensores remotos (ver Figura 1).

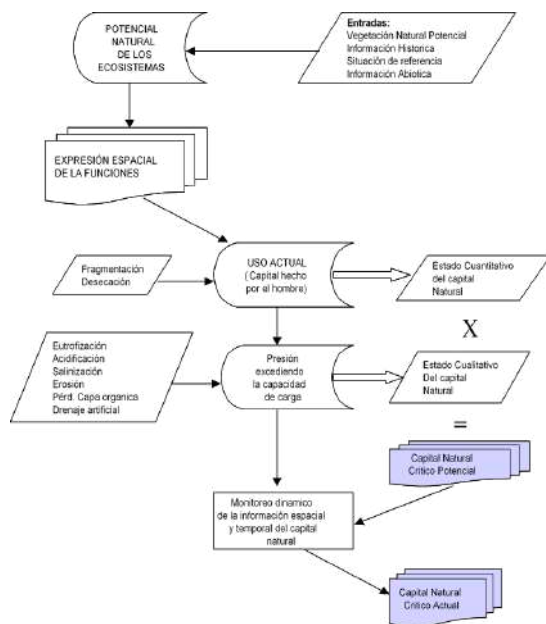


Fig. 1. Modelo conceptual propuesto por Van der Perk y de Groot para la identificación del CNC apoyado en SIG.

Fuente: Adaptado de [9].

A pesar de que esta propuesta permite aumentar la proximidad a las variables espaciales explícitas, todavía subyace un problema habitual

en los estudios territoriales, que consiste en cómo establecer de manera participativa unos escenarios futuros de gestión-interacción. Una respuesta aproximada a esta inquietud puede evidenciarse en [10], cuyos autores usan los SIG en la valoración de las funciones ambientales asociadas a los cambios de uso y degradación del ambiente natural, para analizarlos a través de funciones integradoras. Así, brindan un aporte adicional al abordar el problema de la escala en tres dimensiones: la espacial, la temporal y la social, las cuales están estrechamente relacionadas a preguntas espacialmente explícitas. En este sentido, proponen una metodología consistente en: 1) Determinación del confinamiento del estudio (área de estudio); 2) identificación de aspectos que influyen en la identidad del territorio; 3) el análisis de estos aspectos y su influencia en la calidad y el manejo del territorio; 4) la exploración de los efectos de los cambios de uso sobre la identidad del territorio, y 5) la investigación de la existencia de percepciones asociadas al uso del paisaje. Finalmente, proponen un sistema combinado de modelos, métodos e indicadores que pueden ser usados en la definición de políticas de usos futuros soportados en la identificación de Factores-Actores y Sectores (ver Tabla 1).

Adicionalmente, Risler y Ares [11] sostienen que el ejercicio de mapear es, en esencia, una representación del espacio que alberga subjetividades como formas de interpretación del mundo. Cuando definimos un territorio, más allá de los elementos físicos y geomorfológicos que lo modelan, entendemos que existen relaciones políticas, sociales y culturales entre diversos actores que, de acuerdo con sus intereses, configuran el entorno a partir de distintas perspectivas del territorio. La cartografía convencional contiene simbologías y convenciones que no suelen identificarse con la construcción territorial de las comunidades, y es allí donde el ejercicio de la cartografía social cumple un papel importante como forma de representación por fuera de los límites de esa cartografía, plasmando la complejidad de la estructura social y sus procesos de territorialización que rebaten las narraciones construidas desde discursos hegemónicos.

Tabla 1. Sistema combinado de modelos, métodos e indicadores para definición de políticas de usos futuros del suelo

	Paso	Estrategias y practicas	Tipo de Información	Método	Entrada de Información
Preguntas Clave 2	1.1. Identifique las cuestiones claves y centre en las percepciones del tomador de decisiones	Dialogo entre científicos y tomadores de decisiones	Cualitativa	Talleres, seminarios de trabajo	
	1.2 Lista de Indicadores	Retroalimentación entre científicos y tomadores de decisiones	Tan cuantitativa como sea posible	Redes de Impactos/Modelos	1.1.
	1.3 Definición de Factores, Actores y Sectores (FAS) relevantes	Retroalimentación de científicos	Cualitativa	Redes FAS	1.1 / 1.2
	1.4 Selección casos de estudio	Actividades científicas	Mapas con zonas socioeconómicas y biofísicas	Modelos SIG preliminares	1.2 / 1.3
Preguntas Clave 2	2.1 Antecedentes históricos	Actividades científicas	Cualitativa	Escenarios de las redes FAS existentes	1.3
	2.2 Historia de los casos de estudio seleccionados	Información de representantes locales	Cualitativa	Talleres de trabajo con representantes locales	2.1
	2.3 Proceso de toma de decisiones	Información de representantes locales y regionales	Cualitativa	Juego de roles	
	2.4 Implicaciones en los Factores, Actores y Sectores y los indicadores	Actividades científicas	Cuantitativa	Redes FAS	2.1 / 2.2
Preguntas Clave 3	3.1 Modelos de tendencias a gran escala	Actividades científicas	Cuantitativa	Modelos exploratorios Integrados (multidominio, multiescalar y multifactores)	1.3 / 2.1
	3.2 Modelos de comportamiento de agentes en los casos de estudio	Actividades científicas	Cuantitativa	Modelos basados en agentes y de cambios de coberturas y usos	1.4 / 3.1
	3.3 Interface políticos - Científicos	Actividades científicas	Semicuantitativa	Sistemas de Soporte a las decisiones	3.1 / 3.2
	3.4 Mejora interactiva de modelos	dialogo	Semicuantitativa	Talleres, trabajo con grupos objetivo	3.2 / 3.3

Fuente: Tomado de [10].

Conscientes de que la existencia de un instrumento por sí mismo no garantiza que las variables implícitas evidenciadas por los colectivos sociales puedan ser expresadas en términos espaciales, máxime cuando se deben cumplir con reglas cartográficas y geográficas rigurosas, se procedió a retomar algunos instrumentos técnicos robustos, a saber: la cartografía básica y temática desarrollada por los entes territoriales con jurisdicción en la zona, las imágenes provenientes de los sensores satelitales Landsat 8 y Sentinel 2, y las imágenes topográficas SRTM corregidas y liberadas en fechas recientes para la región de estudio, todo ello combinado con impresos y escenificaciones elaborados con el SIG-ArcGis, que permitieron desarrollar talleres adaptando metodologías provenientes de la cartografía social, para identificar procesos sobre el territorio que solo pudieron ser evidenciados gracias a la interacción directa con las comunidades.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Como punto de partida, se plantea que una metodología de construcción colectiva basada en las redes FAS puede contribuir a resignificar elementos de concertación que, de otro modo, pueden diluirse dentro de la problemática en general. Igualmente, se reinterpretan algunos resultados obtenidos en la zonificación de hechos de la naturaleza, logrados a partir de la cartografía convencional, enriquecida por conceptos y técnicas basados en la evaluación de funciones y servicios ecosistémicos, análisis de sensores remotos y evaluaciones de potenciales hidrológicos.

La región de estudio abarca 26 veredas¹ de los municipios de Urrao, Abriaquí, Cañasgordas, Frontino y Giraldo, pertenecientes a la jurisdicción de Corpourabá, en las cuales se identifican ocho sectores que representan los páramos de la región. En ellos sobresale el denominado El Sol - Las Alegrías, que por sí solo constituye el 66 % del área declarada en la Resolución 0496 de 2016. En la Figura 2 se muestra la localización de este complejo.

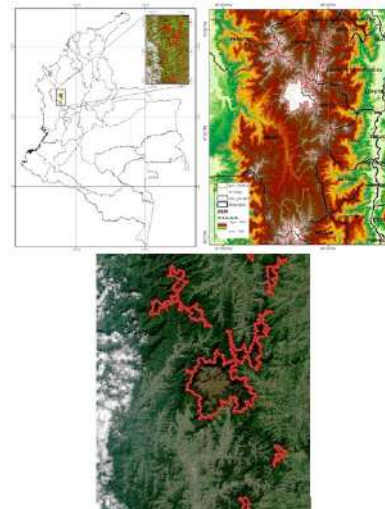


Fig. 2. Localización del Complejo de Páramos Frontino-Urrao (CPFU) con detalle en una composición Landsat Color Real (derecha) sobre el Corredor de las Alegrías-El Sol (nótese el color marrón asociado a la vegetación propia del páramo)

1 División administrativa subordinada a la municipalidad.

Las actividades desarrolladas, a pesar de no haberse ejecutado en estricto orden cronológico, se pueden agrupar a través de las siguientes acciones:

Talleres de cartografía: aproximándonos a un lenguaje común. Con algunos productos cartográficos (analógicos), proyecciones y animaciones se realizó una primera jornada de talleres con una audiencia tan plural como fue posible convocar. Así, bajo la orientación de un animador, se les pidió hacer la ubicación más precisa posible de adhesivos que ilustraban problemáticas (como explotación ilegal de madera), eventos de incidencia territorial notable (como cultivos extensos de frutas), potencialidades (como paisajes escénicamente memorables), y acciones que desde la sociedad civil propenden por la protección del ecosistema (como observatorios regulados de aves). De esta forma, y en cerca de una decena de talleres realizados en diferentes veredas, se logró identificar hechos que se pueden denominar “eventos geográficos”, dado que su localización nos permite sistematizarlos por asociación con elementos geográficos explícitos, como son la vereda o incluso la microcuenca (ver Figura 3).



Fig. 3. Talleres participativos de localización de eventos geográficos. Derecha: resultado de uno de los grupos en la vereda El Chuscal.

Identificando Factores, Actores y Sectores. Este ejercicio, también evidentemente participativo, consistió en la identificación de actores y su respectivo posicionamiento social. Este método de campo es también conocido como mapas sociales o

sociogramas [12], pues el mapeo de actores claves (MAC) supone el uso de esquemas para representar la realidad social y establecer estrategias de cambio, que, en nuestro caso, tienen que ver con una realidad socioambiental que se deconstruye hacia una estrategia de manejo integral de los recursos del páramo y sus áreas de influencia. Debe aclararse que no solo se trata de un listado de posibles actores presentes en el territorio, sino que también se busca conocer sus acciones y los objetivos de su presencia y sus perspectivas de futuro.

Se parte de una lista exhaustiva de factores ambientales geográficamente reconocibles, y a partir de allí se pide a los participantes que identifiquen los distintos actores con presencia en la zona del páramo y posibles áreas de amortiguamiento. Los actores fueron previamente categorizados por el equipo de investigadores en cuatro grupos básicos: sector público, sector privado, organizaciones de la sociedad civil, y una última categoría de gestores de conocimiento (públicos, privados y Organizaciones No Gubernamentales —ONG—). Se propone su ubicación en un plano cartesiano que confronta su presencia y relevancia en la toma de decisiones de acciones y actividades en el páramo.

La Figura 4 ilustra el resultado de uno de estos talleres. De forma anecdótica, puede evidenciarse que algunas instituciones presentan una relevancia alta, pero presencia baja, aunque la calificación asignada a la relevancia se otorga más en el sentido de la “necesidad”. Por otro lado, se evidencian amontonamientos con especial énfasis en los factores que emergen como amenazas o sectores asociados al uso de los recursos naturales, lo cual en general parece ser una tendencia rechazada para el páramo y sus zonas aledañas.

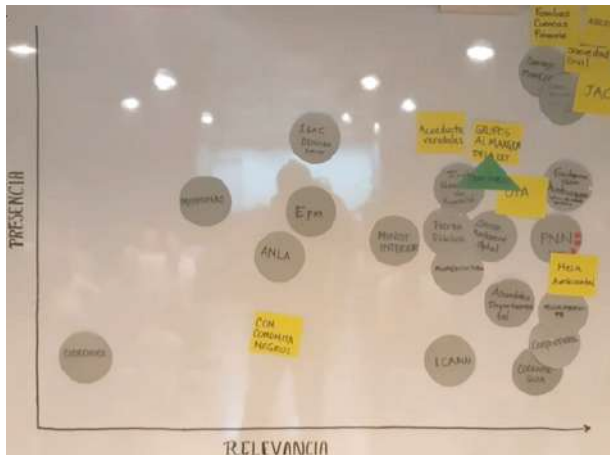


Fig. 4. MAC. Metodología de construcción de Mapa de Actores Sociales para la toma de decisiones en el páramo de Frontino Urrao (Urrao, Antioquia, 13 de julio de 2018)

Explorando Estrategias de Regulación y Control. Camino al modelo PER. Uno de los mitos fundacionales de la gestión ambiental y territorial ha sido “la búsqueda de escenarios de solución que permitan conciliar la oferta ambiental con la demanda social”, tal como lo plantean las instituciones del orden supranacional [13]. Sin embargo, este propósito requiere planes de manejo que al menos propendan por aminorar las posibles fragilidades teóricas y ello conduce a la exploración, con distintos actores sociales, de sus percepciones, visiones y necesidades sobre la oferta y la demanda presentes de los ecosistemas que habitan, a la vez que se indaga sobre las distintas proyecciones y deseos futuros que tienen como actores que construyen la territorialidad.

Al retomar los conceptos de funciones y servicios ecosistémicos, es posible proponer que cualquier

acción sobre el territorio va a tener una factibilidad de realizarse (conductancia) y una resistencia a que ello suceda (impedancia), ambas evaluadas en forma multiescalar y multidimensional. Es así como se propuso una estrategia de valoración cualitativa de “hechos que suceden o podrían suceder en el territorio” considerando la dicotomía de factibilidad-resistencia. Como resultado se identificaron cuatro grandes características que eran fácilmente asimilables y evaluables con base en los contextos sociales y técnicos, tanto desde la posibilidad de otorgarles una importancia relativa en la pervivencia del páramo y zonas aledañas, como en la identificación de la presión que ellas afrontan o podrían afrontar. Las características seleccionadas fueron: Coberturas (con énfasis en la vegetación propia del sistema y de posibles cinturones protectores), regulación hídrica (modelos de captación y acumulación de flujos), provisión de bienes y servicios y la potencialidad de determinadas zonas para servir de nicho, refugio y tránsito de especies amenazadas.

En primer lugar, se construyeron una serie de mapas correspondientes a funciones síntesis, procesados a partir de imágenes Landsat 8, SRTM, Sentinel 2 y cartografía oficial, desarrollando diferentes composiciones en color real y pseudocolor, índices de vegetación, Tasseled Cap y componentes principales, así como modelos de elevación, pendientes, cuencas y acumulación de flujos [14]. Estas representaciones espaciales se convirtieron en plantillas precursoras a partir de las cuales la comunidad (habitantes, gestores y académicos) establece algunas evaluaciones que luego fueron jerarquizadas y ponderadas por los investigadores del proyecto (ver Figura 5).

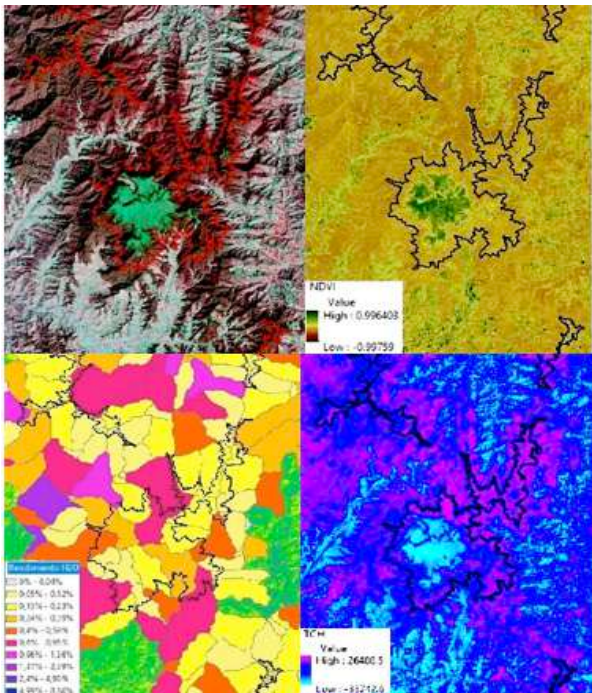


Fig. 5. Detalle sobre el páramo de El Sol-Las Alegrías, de algunos insumos obtenidos a partir de sensores remotos.

Nótese el color esmeralda rodeado de marrón (páramo y bosques circundantes) en el falso color (izquierda), y las respuestas disímiles del índice de vegetación (alto valor) y del Tasseled Cap Humedad (bajo valor), mientras que el modelo de acumulación de flujos muestra valores que dependen predominantemente de la pendiente y el aspecto de ella.

Dado que se detecta una enorme variabilidad en los insumos analizados, y que algunos fenómenos solo son perceptibles a escalas detalladas, se privilegiaron los resultados que se podían obtener de las imágenes Sentinel 2 y de la cartografía oficial escala 1:25.000. Fue así que se establecieron, para estos productos y escalas, unas ponderaciones relativas del estado de las cuatro características arriba mencionadas, al igual que la presión que ellas mismas podrían sufrir. La Figura 6 ilustra estas valoraciones.

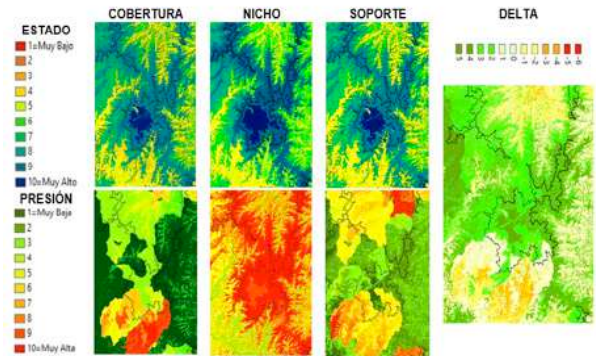


Fig. 6. Valoración espacial de las variables de Estado y Presión apoyadas en imágenes Sentinel 2 en las bandas de celda 10x10 m. Derecha: Ilustración espacial de la Presión vs. Estado si todas las variables tuviesen la misma ponderación.

IX. CONCLUSIONES

La fusión de metodologías cuantitativas y cualitativas puede involucrar múltiples inconvenientes y aproximaciones, sin embargo, en el trabajo expuesto es posible evidenciar que las metodologías participativas se pueden alimentar con información que se adquiere o procesa de forma muy técnica, pero, habitualmente, sin participación de las comunidades. En este caso, las imágenes Sentinel 2 fueron de gran ayuda para obtener una lectura actualizada del fenómeno estudiado. Ellas permitieron jerarquizar los estados de la naturaleza, al tiempo que la participación de las comunidades y la investigación social brindaron los insumos para ponderar y especializar las presiones. Aventurando un resultado final, es posible suponer que existirá un mapa delta que alerte a los gestores territoriales y habitantes de donde se presentan desequilibrios que puedan indicar la necesidad de proteger y recuperar, y donde este frágil equilibrio se mantiene, pero es aconsejable conservar, o aprender de él para usar este conocimiento en otras regiones y circunstancias.

Es importante resaltar que la utilización de información producto de sensores remotos, tales como Sentinel, Landsat, y modelos de elevación de radar como Alos Palsar, posibilitan acceder de forma libre y rápida a información de superficies

terrestres de alta escala y fundamental para la modelación de escenarios para la gestión del territorio, la cual es difícil y costosa de levantar en tierra. Esta información satelital puede ser validada por instrumentos en tierra y por la cartografía social obtenida en los talleres con las comunidades presentes en las zonas de páramos.

REFERENCIAS

- [1] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia (Minambiente), Resolución 0496 del 22 de marzo 2016. “Por medio de la cual se delimita el Complejo de Páramos Frontino – Urrao “Páramo del Sol – Las Alegrías” y se adoptan otras determinaciones.
- [2] M. Morales, J. Otero, T. Van der Hammen, A. Torres, C. Cadena, C. Pedraza, N. Rodríguez, C. Franco, J. C. Betancourth, E. Olaya, E. Posada y L. Cárdenas, Atlas de páramos de Colombia, Bogotá: Instituto Alexander von Humboldt, 2007.
- [3] Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), Cambio climático 2007: Informe de síntesis, Ginebra, Suiza: OMM, PNUMA, 2007.
- [4] L. H. Estupiñán, J. Gómez, V. Barrantes y L. Limas, “Efecto de actividades agropecuarias en las características del suelo en el páramo El Granizo, (Cundinamarca, Colombia)”, Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica, vol. 12, N.º 2, pp. 79-89, 2009.
- [5] E. Guerrero, Implicaciones de la minería en los páramos de Colombia, Ecuador y Perú. Documento de trabajo. Biblioteca virtual RS, 2009. [En línea]. Disponible en: <http://bibliotecavirtual.info/2011/04/implicaciones-de-la-mineria-en-los-paramos-de-colombia-ecuador-y-peru-documento-de-trabajo/> [Accedido el 23 de noviembre de 2013].
- [6] J. M. Naredo, “Sobre el origen, el uso y el contenido del término sostenible”, Documentación Social, N.º 102, pp. 129-147. Ed. Caritas Española.
- [7] J. F. Noël, y M. O’connor, “Strong Sustainability and Critical Natural Capital”. En Valuation for Sustainable Development: Methods and Policy Indicators. Faucheux, S., O’Connor, M., (Eds.). Edward Elgar Publisher, Cheltenham, 1998, pp. 75–99.
- [8] J. Van der Perk and R. de Groot, Towards a method to estimate Critical Natural Capital. An inventory of methods to determine critical natural capital in the Netherlands. Discussion paper for second meeting of the CRITINC-project, 30/11 – 1/12, 1998, Paris, France, 2000.
- [9] J. Escobar y S. Lopera, “El Concepto de Capital Natural Crítico Aplicado a la Gestión de Recursos Energéticos”, en Memorias del cuarto Taller Internacional de Energía y Medio Ambiente. Cienfuegos, Cuba: Centro de Estudios de Energía y Medio Ambiente (CEEMA), 2006.
- [10] K. Knickel and K. Kok, “Future Land Use in Europe: Trends, Challenges and Policy (FLU-E)”, International Workshop Transition in Agriculture and Future Land Use Patterns, December 1-3, 2003 - Wageningen, The Netherlands: Institute for Rural Development Research (IfLS) at J. W. Goethe – University Frankfurt (D).
- [11] J. Risler, y P. Ares, Manual de mapeo colectivo: recursos cartográficos críticos para procesos territoriales de creación colaborativa. Buenos Aires: Tinta Limón, 2013.
- [12] M. M. Ceballos, “Manual para el desarrollo del mapeo de actores claves –MAC. Elaborado en el marco de la consultoría técnica GITEC-SERCITEC, 2004.
- [13] EC-FAO, “Stakeholders Analysis”, Annex I to lesson “understanding the Users’ Information Needs”, Food Security Information for Action Programme, FAO-EU, 2006.
- [14] D. Maidment, ed., Arc Hydro: GIS for Water Resources, Redlands, CA, USA: ESRI, 2002.

Capítulo XII

Modelamiento de la Concentración de Contaminantes en Suelos por el Método de Diferencias Finitas Utilizando Esquemas de Primero y Segundo Orden

Wilson Alberto Contreras - wcontre@unipamplona.edu.co

Docente -investigador, Universidad de Pamplona, Colombia

José Orlando Maldonado, orlmaldonado@unipamplona.edu.co

Docente-investigador, Universidad de Pamplona, Colombia

John Alexander Bohada, jbohada@jdc.edu.co

Docente-investigador, Fundación Universitaria Juan de Castellanos, Colombia

I. INTRODUCCIÓN

Hasta la aparición de efectos ambientales adversos, el enfoque en el análisis de las propiedades de los pesticidas se concentraba en su efectividad para el control de plagas. Actualmente, es mucho más importante analizar su destino ambiental: toxicidad, transporte, degradación, etc. De este modo, para que un pesticida se pueda aplicar, la legislación exige, entre otros requisitos, la realización de una serie de ensayos de campo y de laboratorio que permitan evaluar su comportamiento en el medio natural. En concreto, se examinan:

- La toxicidad del pesticida y sus productos de degradación sobre plantas y animales.
- El destino químico y el transporte del pesticida en el suelo, el aire y el agua.

A partir de datos obtenidos experimentalmente se pueden elaborar modelos de simulación que, una vez calibrados, permiten ampliar el conocimiento sobre el sistema estudiado en situaciones que no se han medido de forma experimental. El modelado matemático como herramienta de descripción es aplicable en la mayoría de las áreas de conocimiento y permite el estudio del comportamiento de sistemas complejos.

Los modelos numéricos para el estudio del comportamiento de los contaminantes en suelos continúan siendo de interés en la comunidad académica y científica. En [1] se propone el uso de barreras capilares de dos y tres capas como una solución eficiente para minimizar la migración en el suelo y se desarrollan los métodos numéricos para su simulación, sin dar detalles de los métodos desarrollados. En [2] se desarrolla un modelo utilizando métodos de elementos finitos, para predecir el proceso de contaminación de suelos saturados de forma variable por los contaminantes transportados en la escorrentía. En [3] se han desarrollado experimentos de columna aplicados a diez suelos con propiedades contrastantes y representativos de los tipos de suelo de captación y usos de la tierra, con el fin de evaluar el riesgo de contaminación de los recursos hídricos en el contexto del Altiplano boliviano. Sin describir el modelo, se presentan los resultados obtenidos a partir de la simulación mediante elementos finitos. Los resultados permiten describir los riesgos potenciales de contaminación de las aguas superficiales y subterráneas.

Dada la importancia del estudio de los pesticidas, se ha considerado conveniente desarrollar un modelo sencillo del transporte de pesticidas en el suelo que pueda ser utilizado en clases prácticas de simulación. El uso de un modelo de este tipo permite

analizar el efecto de la aplicación de insecticidas y herbicidas. Para utilizar el modelo, hay que conocer las propiedades físico-químicas del producto estudiado. Estas características están recogidas en las etiquetas de los productos comerciales.

El modelo presentado se desarrolla utilizando como lenguaje de modelado Python, junto a las librerías Numpy y Matplotlib para desplegar los resultados gráficos.

II. DESCRIPCIÓN DEL MODELO

Se presenta un modelo para describir la lixiviación y la degradación de un pesticida en un tipo específico de experimento de la columna, para lo cual se estudiará la solución analítica dada por Freijer [4]. En dicho experimento de la columna [5], se prepara una mezcla de suelo y pesticida con una cierta concentración total inicial. Esta mezcla se coloca como una capa con un espesor de 2 cm encima de una columna del mismo tipo de suelo. La columna de tierra debe tener una longitud de 28 cm y un diámetro de 5 cm. La capa delgada es así bastante pequeña comparada con la longitud de la columna. El suelo en la columna está saturado con agua antes de colocar la capa en ella. El agua se suministra por encima, con una tasa conocida constante, que induce el transporte del pesticida de la capa superior que contiene el pesticida hacia abajo. El BBA [6] recomienda un período de lixiviación de dos días en un flujo de Darcy de . Alternativamente, US-EPA [7] sugiere, para residuos antiguos de pesticidas, un período de lixiviación de 45 días en un flujo de Darcy de . Aunque el último guion esté pensado para residuos antiguos, puede ser aplicado también a mezclas frescas de suelo y pesticida. En el fondo de la columna hay desagüe. En el suelo empacado y la capa delgada, el pesticida es redistribuido sobre las fases sólidas y líquidas, y degradado por microorganismos, lo cual hace que la concentración cambie en el tiempo y el espacio. Durante el experimento, el efluente es reunido y es analizado. Después de un cierto período en el que ha habido lixiviación, el experimento se detiene y la columna de suelo se secciona en varias capas, las cuales son analizadas de forma separada.

A. Desarrollo del modelo

Los cuatro procesos considerados cuando se modela la lixiviación en la columna son: advección y dispersión unidimensionales a través de la fase líquida, sorción a la fase sólida, y a la degradación biológica. La ecuación que describe el balance de masa en la columna es (las ecuaciones para este modelo son dadas por [4]):

$$\frac{\partial X}{\partial t} = -\frac{\partial J_s}{\partial z} - kX, \quad (1.1)$$

Donde X es la concentración total del pesticida, t es el tiempo, z es la distancia, y k es la constante de degradación. Esta tasa constante está relacionada con la vida media del compuesto mediante la ecuación (1.2):

$$T_{50} = \frac{\ln(2)}{k}. \quad (1.2)$$

El flujo total transportado es la suma del transporte advectivo y dispersivo:

$$J_s = v\theta C - D\theta \frac{\partial C}{\partial z}, \quad (1.3)$$

Donde v es la velocidad del agua en el poro, θ es el contenido de agua, y C es la concentración residente en la fase líquida. El coeficiente de dispersión, incluidas la difusión y la dispersión hidrodinámica, es,

$$D = D_0\kappa + \alpha v, \quad (1.4)$$

Donde D_0 es el coeficiente de difusión en el agua, κ es el factor de la matriz del terreno, y α es la longitud de la dispersión. La concentración total es igual a la suma de la concentración de la fase sólida y la concentración de la fase líquida:

$$X = \theta C + \rho Y, \quad (1.5)$$

Donde es la concentración en la fase sólida, y la densidad de la masa seca. Se asume que el pesticida en la fase sólida y la fase líquida está en el equilibrio de acuerdo con un isoterma lineal:

$$Y = K_{oc} f_{oc} C, \quad (1.6)$$

Donde es el coeficiente de adsorción de referencia de la materia orgánica, y la materia orgánica contenida. Al combinar las ecuaciones se obtiene la ecuación de gobierno:

$$R \frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - v \frac{\partial C}{\partial z} - RkC, \quad (1.7)$$

con el factor de retardación, , definido como

$$R = 1 + \frac{\rho f_{oc} K_{oc}}{\theta}. \quad (1.8)$$

Al llegar a la ecuación (1.7), se han tenido en cuenta las siguientes suposiciones: (i) el contenido de agua, la velocidad del flujo y el coeficiente de dispersión son constantes; (ii) la advección y la dispersión ocurren sólo en dirección vertical; (iii) el factor de retardación es independiente de la concentración; (iv) las transformaciones en las fases líquida y sólida ocurren en la misma tasa.

B. Condiciones iniciales y de contorno

La capa que contiene inicialmente el pesticida se considera que forma parte de la columna, y es incorporada en las condiciones iniciales. El dominio del modelo está dado desde $z = -l$ a $z = \infty$.

Las condiciones iniciales son [4]:

$$C(z, 0) = C_0, \quad -l < z \leq 0, \quad (1.9)$$

$$C(z, 0) = 0, \quad 0 < z \leq \infty, \quad (1.10)$$

Donde es la concentración inicial y es el espesor de la primera capa añadida a la columna de tierra. Son necesarias dos condiciones de contorno. En la definición de la condición de contorno

superior se asume que el agua agregada en esta parte de la columna es libre de pesticida. Además, se asume que no hay declive de la concentración en la profundidad infinita. Por consiguiente, las condiciones de la frontera son dadas como:

$$vC(-l, t) - D \frac{\partial C}{\partial z}(-l, t) = 0, \quad t \geq 0, \quad (1.11)$$

$$\frac{\partial C}{\partial z}(\infty, t) = 0, \quad t \geq 0. \quad (1.12)$$

C. Solución de la ecuación de gobierno

La ecuación de gobierno (1.7) se puede resolver por medio de la transformada de Laplace, técnica usada para ambos dominios semi-infinitos e infinitos. El método de separación de variables es un método alternativo de solución, el cual fue utilizado para verificar los resultados de las soluciones obtenidas con la técnica de la transformada de Laplace. Las variables dimensionales [8] introducidas son:

$\zeta = \frac{vz}{D}$, $\tau = \frac{v^2 t}{RD}$, $\varepsilon = \frac{kRD}{v^2}$, $\lambda = \frac{lv}{D}$,
y el número de Peclet, $p = \frac{Lv}{D}$, donde es la longitud de la columna.

Seguidamente, se presenta la solución analítica de la ecuación (1.7), que está dada por (ver [8]):

$$C(\zeta, \tau) = \frac{1}{2} C_0 \exp(-\varepsilon \tau) \{P + \exp(\zeta + \lambda) Q\}, \quad (1.13)$$

Con,

$$P = \operatorname{erfc} \left[\frac{\zeta - \tau}{2\sqrt{\tau}} \right] - \operatorname{erfc} \left[\frac{\zeta + \lambda - \tau}{2\sqrt{\tau}} \right], \quad (1.14)$$

y,

$$Q = (1 + \tau + \zeta + \lambda) \operatorname{erfc} \left[\frac{\tau + \zeta + \lambda}{2\sqrt{\tau}} \right] \frac{2\sqrt{\tau}}{\sqrt{\pi}} \exp \left[\frac{-(\tau + \zeta + 2\lambda)^2}{4\tau} \right] - (1 + \tau + \zeta + 2\lambda) \operatorname{erfc} \left[\frac{\tau + \zeta + 2\lambda}{2\sqrt{\tau}} \right] + \frac{2\sqrt{\tau}}{\sqrt{\pi}} \exp \left[\frac{-(\tau + \zeta + 2\lambda)^2}{4\tau} \right] \quad (1.15)$$

III. SOLUCIÓN NUMÉRICA DEL MODELO

El problema que nos planteamos es encontrar una función que represente numéricamente la concentración de una sustancia, solución de la ecuación convección-dispersión dada anteriormente,

$$R \frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - v \frac{\partial C}{\partial z} - RkC, \quad (1.16)$$

cuyas condiciones iniciales se presentan de la siguiente manera: La primera capa, que contiene inicialmente el pesticida, es considerada parte de la columna, y es incorporada en las condiciones iniciales.

Para el caso analítico, el dominio del modelo está dado desde a , y las condiciones iniciales son:

$$C(z, 0) = C_0, \quad -l < z \leq 0, \quad (1.17)$$

$$C(z, 0) = 0, \quad 0 < z \leq \infty. \quad (1.18)$$

Para el caso numérico, varían dichas condiciones como se muestra a continuación y se aprecia en la Figura 1.

$$C(z, 0) = C_0, \quad 0 \leq z \leq l, \quad (1.19)$$

$$C(z, 0) = 0, \quad l < z \leq L, \quad (1.20)$$

De modo que se tiene el valor inicial en el intervalo 0 en el intervalo l . se toma suficientemente grande para que se pueda considerar un dominio semi-infinito para el problema.

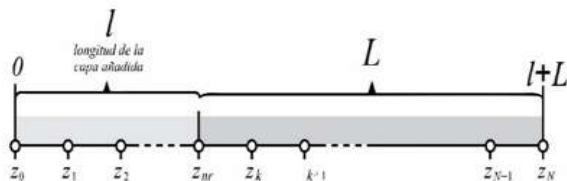


Fig. 1. Representación gráfica del problema numérico

Por consiguiente, las condiciones en los extremos en los distintos instantes de tiempo también deben variar, y se obtienen las ecuaciones siguientes:

$$vC(0, t) - D \frac{\partial C}{\partial z}(0, t) = 0, \quad t \geq 0, \quad (1.21)$$

$$\frac{\partial C}{\partial z}(L, t) = 0, \quad t \geq 0. \quad (1.22)$$

A. Discretización espacial

Para transformar la ecuación en derivadas parciales en un sistema de ecuaciones diferenciales, se procede a discretizar la variable espacial z , en el intervalo $[0, L]$, haciendo subintervalos de longitud h , por lo que la malla se puede definir como $z_0 = 0, z_1 = 0+h, \dots, z_M = L$.

Una vez que se ha discretizado la variable espacial hemos de hacer lo propio con las derivadas espaciales. Por lo que se tiene una aproximación a la primera derivada, utilizando la fórmula de diferencias centradas [9].

$$\left. \frac{\partial C(z, t)}{\partial z} \right|_{z_j} = \frac{C((j+1)\Delta z, t) - C((j-1)\Delta z, t)}{2\Delta z} - \frac{(\Delta z)^2}{6} \left. \frac{\partial^3 C(z, t)}{\partial z^3} \right|_{\zeta_j}, \quad (1.23)$$

Donde $\zeta_j \in [(j-1)\Delta z, (j+1)\Delta z]$.

La aproximación por diferencias centradas anterior tiene un error local de truncamiento de la aproximación de $\frac{\partial C}{\partial z}$, que viene dado por el residuo del desarrollo en serie de Taylor. La aproximación a la segunda derivada por la fórmula de diferencias centradas viene dada por

$$\left. \frac{\partial^2 C(z, t)}{\partial z^2} \right|_{z_j} = \frac{C((j+1)\Delta z, t) - 2C(j\Delta z, t) + C((j-1)\Delta z, t)}{(\Delta z)^2} - \frac{(\Delta z)^2}{12} \left. \frac{\partial^4 C(z, t)}{\partial z^4} \right|_{\zeta_j},$$

Donde $\zeta_j \in [(j-1)\Delta z, (j+1)\Delta z]$.