

COFI-Water

Fortalecimiento del monitoreo y evaluación de la calidad del agua en Colombia



Suomen ympäristökeskus
Finlands miljöcentral
Finnish Environment Institute



Proyecto COFI-Water

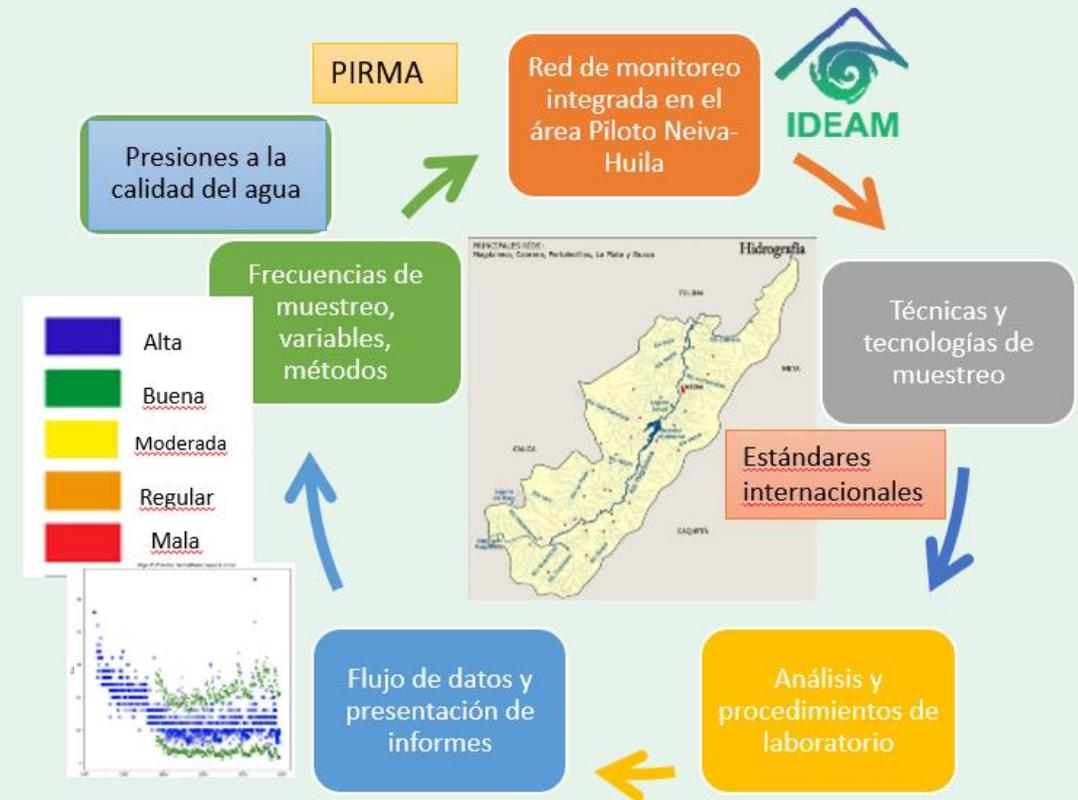
El proyecto "**Fortalecimiento del monitoreo y evaluación de la calidad del agua en Colombia** (COFI-Water)" fue una iniciativa conjunta entre el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM) y el Instituto Finlandés de Medio Ambiente (Syke). Fue financiado por el Ministerio de Asuntos Exteriores de Finlandia (MFA) a través del Instrumento de Cooperación Institucional en 2019-2023.

La colaboración tuvo como objetivo mejorar las capacidades del IDEAM para planificar, establecer y operar sistemas de monitoreo de la calidad del agua a nivel nacional en Colombia. COFI-Water apoyó al IDEAM en la implementación de las actividades trazadas en la "Hoja de ruta para el monitoreo de la calidad de las aguas superficiales en Colombia" (2016). El efecto **a largo plazo** producido por la invención de desarrollo, es decir, el **impacto** del proyecto COFI-Water, es un **fortalecimiento del monitoreo y evaluación de la calidad del agua en Colombia**. El objetivo era contar con una red nacional operativa de calidad del agua que ofreciera datos de alta calidad para las necesidades de evaluación.

El objetivo del proyecto era que las autoridades colombianas pudieran **medir y monitorear sistemáticamente la calidad de sus aguas superficiales y las variables que las afectan**. Es necesario aplicar normas internacionales y directrices de monitoreo para determinar la calidad y que tanto el muestreo como el análisis de las aguas se realicen en consecuencia. **El monitoreo oportuno y confiable** del agua es esencial para reducir los impactos nocivos en los procesos sociales y naturales, especialmente en la salud humana, y para promover una sociedad sostenible con un acceso equitativo al agua y al saneamiento, así como a la base de los medios de vida. Todos los productos y actividades del proyecto se conectaron al ciclo de seguimiento (Figura 1).

El proyecto se centró especialmente en el **monitoreo de pesticidas** en el medio acuático y en los métodos de muestreo y análisis en relación que son necesarios.

Figura 1. Salidas y actividades relacionadas con el ciclo de monitoreo



PIRMA = Programa Institucional Regional de Monitoreo de la Cantidad y Calidad del Agua, Colombia

Pesticidas en Colombia

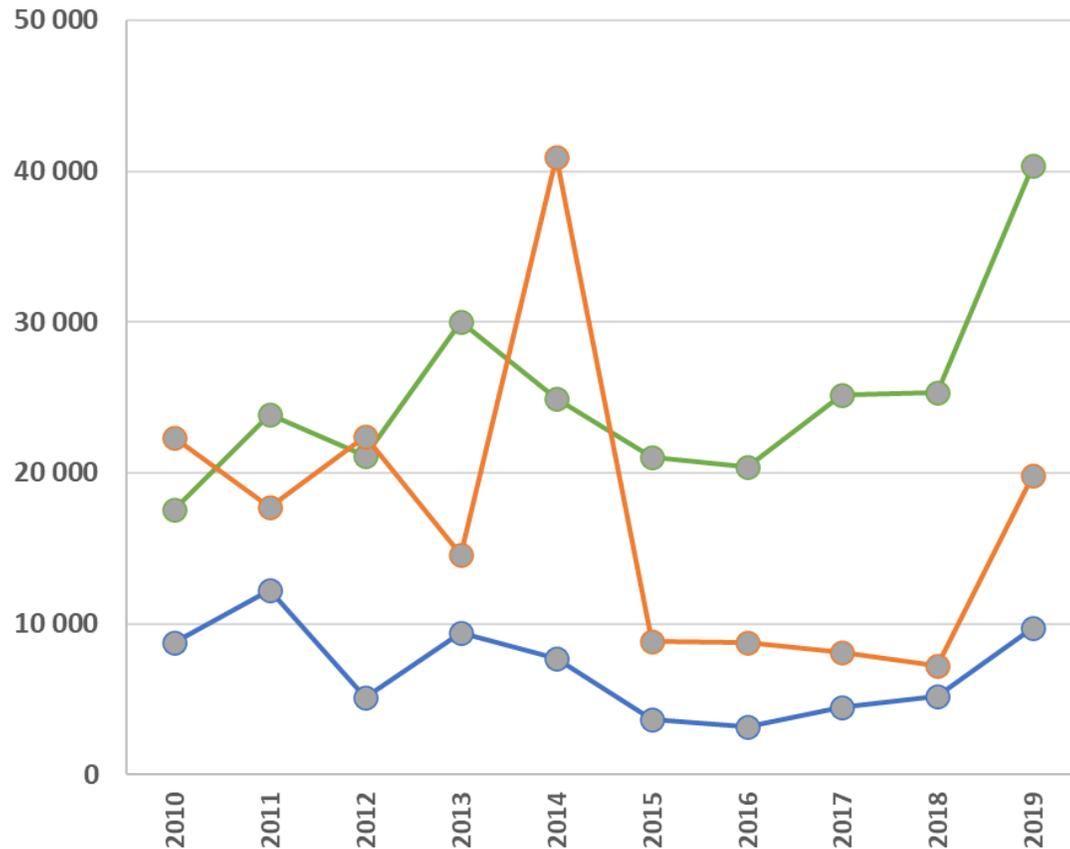
Colombia es uno de los mayores productores mundiales de café, banano y aceite de palma, y estos cultivos a menudo se fumigan fuertemente con **pesticidas** para protegerlos de plagas y malezas. La venta de pesticidas ha aumentado en América del Sur más que en cualquier otro continente (FAO 2022, Figura 2). Valbuena et al. (2021) encontraron que una alta proporción de plaguicidas vendidos en Colombia se clasificó en la peor categoría según toxicidad aguda. Además, concluyeron que en Colombia se necesita un sistema integral de información y monitoreo para evaluar los riesgos de los pesticidas para los seres humanos y el ambiente. La importancia de esto está respaldada por un reciente estudio sobre la de salud humana, en el que Meléndez-Flórez et al. (2022) detectaron alteración cromosómica en personas colombianas expuestas ocupacionalmente a pesticidas. Es probable que las personas afectadas sean signos de que los pesticidas también pueden dañar los ecosistemas. **Incluso cuando los pesticidas están presentes en bajas concentraciones, estos podrían crear graves problemas.**

De acuerdo con el estudio de tamizaje realizado por el IDEAM y Syke, las concentraciones de pesticidas en las muestras de agua fueron principalmente bajas (por debajo de los límites de cuantificación), pero se observó una concentración potencialmente riesgosa del insecticida dichlorvos en una muestra. Sobre la base de esta mini-detección, los riesgos generales causados por los pesticidas en la biota acuática fueron probablemente aceptables en 2/3 de los grandes ríos. Sin embargo, muchos plaguicidas fueron detectados por muestreadores pasivos que indicaban su presencia en los sitios de muestreo. Es probable que sus concentraciones en algunos sitios aguas arriba hayan sido mucho más altas.

Recomendaciones

- El monitoreo de pesticidas en los ríos colombianos debe continuar.
- Esto incluye que los métodos analíticos se desarrollen aún más y cubran el mayor número posible de sustancias potencialmente peligrosas con los límites de detección pertinentes.
- Una forma de estudiar la relevancia es comprobar aquellas sustancias que se encontraron en la mini-detección, ya sea en agua o en muestreadores pasivos.

Figura 2.
Uso estimado (toneladas/año) de pesticidas en Colombia.
herbicidas, fungicidas, insecticidas



Datos: faostat.org/en/#data/RP

Métodos de muestreo

Directrices y documentación de muestreo

El muestreo tradicional de agua -de agarre o manual- y el transporte de muestras está en un buen nivel en el IDEAM. La documentación está disponible en el sistema de laboratorio (Manual de buenas prácticas). El experto de Syke realizó una auditoría del procedimiento de muestreo del IDEAM. Se observaron algunas desviaciones entre las instrucciones escritas y el muestreo implementado. La auditoría es una buena herramienta para comprobar periódicamente los procedimientos operativos.

Técnicas y tecnologías de muestreo

Syke produjo tres videos con fines de capacitación: muestreo de agua, recolección de fauna de fondo y mediciones con un medidor de campo (ver enlaces a continuación). Durante el viaje de estudios, se capacitó en el uso de diferentes tipos de técnicas de muestreo para muestreo de agua y muestreo biológico (perifitón). Se presentaron nuevos métodos a los expertos del IDEAM: muestreo pasivo de pesticidas y metales, utilizando datos satelitales, y monitoreo en línea para el monitoreo de la calidad del agua.

Junto con los expertos de Syke, los expertos del IDEAM han pasado por el proceso de licitación y adquisición de una sonda multiparamétrica, han visto la instalación de la sonda y han recibido capacitación de usuarios en relación con ella. Ya están familiarizados con los datos obtenidos de la sonda. Además, se adquirieron dos nuevos medidores de campo (Horiba, U-50G) para facilitar el muestreo.

Cooperación con el sector privado

Durante las capacitaciones y talleres se han demostrado y debatido nuevas tecnologías y soluciones para el monitoreo en línea proporcionadas por los sectores privados de Finlandia y Colombia.

Vídeos de muestreo

En el marco del proyecto se produjeron tres vídeos de capacitación (see [English versions](#))



[Toma de muestras de agua de un río con una toma de muestras Limnos](#)



[Medición de la calidad del agua en un río con un medidor de campo Horiba](#)



[Recolectando fauna bentónica en un arroyo con el método KickNet](#)



Recomendaciones

- Se recomienda realizar auditorías para todo tipo de procedimientos de muestreo.
- La producción de videos para las necesidades de capacitación ayuda a mantener la calidad del muestreo en un buen nivel, lo cual es un requisito previo absoluto para obtener resultados de monitoreo de la calidad del agua de alta calidad.



Métodos de monitoreo y nuevos enfoques

En el **muestreo tradicional de agua -de agarre o manual-**, los resultados describen la concentración del parámetro estudiado en un momento determinado del tiempo, es decir, el tiempo de muestreo. La muestra de agua de agarre contiene tanto partículas unidas como fracción disuelta del producto químico. En las muestras de agua de agarre, las concentraciones de las sustancias químicas estudiadas pueden permanecer por debajo de los límites de detección del laboratorio, lo que significa que se necesita un método de muestro más sofisticado. Además, el transporte de, por ejemplo, un litro de muestra de agua al laboratorio de análisis puede afectar a la estabilidad de la muestra.

El **muestreo pasivo** proporciona una herramienta para recolectar productos químicos durante un período de tiempo prolongado, por ejemplo, de 2 a 4 semanas para concentrar las bajas concentraciones de productos químicos, que pueden permanecer indetectables en la muestra de agua de agarre, a un nivel medible. Esto significa que es posible observar concentraciones más bajas con el muestreo pasivo que con el muestreo por agarre. El muestreador pasivo recoge la fracción disuelta del producto químico, que es la fracción biodisponible y, dependiendo del producto químico, podría ser más perjudicial para los organismos que la fracción unida a partículas. El resultado del muestreador pasivo es una concentración media ponderada en el tiempo del compuesto durante el período de estudio. Por lo tanto, las técnicas de muestreo de agarre o manual y de muestreo pasivo miden cosas diferentes.

Foto 1. Danilo Uasapud toma muestra de macroinvertebrados.

Desarrollo del sistema de gestión de calidad del laboratorio IDEAM

Uno de los objetivos del proyecto fue fortalecer la capacidad del laboratorio del IDEAM de acuerdo con la norma internacional ISO/IEC 17025. Cuando se pretende proporcionar información actualizada sobre la calidad del agua, la fiabilidad de los datos sobre la calidad del agua producida es de gran importancia. El laboratorio del IDEAM aspira a obtener la acreditación ISO/IEC 17025 y ya ha realizado una auditoría interna por parte del Grupo de Acreditación de la Subdirección de Estudios Ambientales, IDEAM, que actúa como organismo de acreditación de los laboratorios ambientales en Colombia.

A lo largo del proyecto se llevaron a cabo varias sesiones de capacitación, en las que se abordaron temas relacionados con las herramientas de gestión de datos, el sistema de gestión de la información de laboratorio, los cálculos de la incertidumbre de medición de los resultados obtenidos, la validación de métodos, así como la garantía y el control de calidad del laboratorio. Además, se incluyeron temas específicos relacionados con la norma ISO/IEC 17025. Syke proporcionó una introducción y capacitación práctica para el software de cálculo de incertidumbre de medición (MUKit). El software estuvo disponible inicialmente en inglés y durante el proyecto también se tradujo al español y ahora está en uso en el laboratorio del IDEAM.

Se realizó una comparación inter-laboratorios entre los laboratorios IDEAM y Syke para el análisis de pesticidas con el fin de obtener información sobre el estado actual del método. El laboratorio IDEAM también participó en la prueba de aptitud ProfTest Syke para análisis de agua natural ([Koivikko et al. 2023](#)).

Recomendaciones

- El primer ámbito de acreditación podría ser sólo para algunos parámetros.
- Lograr la acreditación y mantenerla requeriría más personal permanente.
- Se recomienda realizar auditorías internas.



Foto 2. Rodrigo Pérez and Marja Hagström examinando los resultados de GC-MS/MS



Foto 3. Laboratorio del IDEAM.

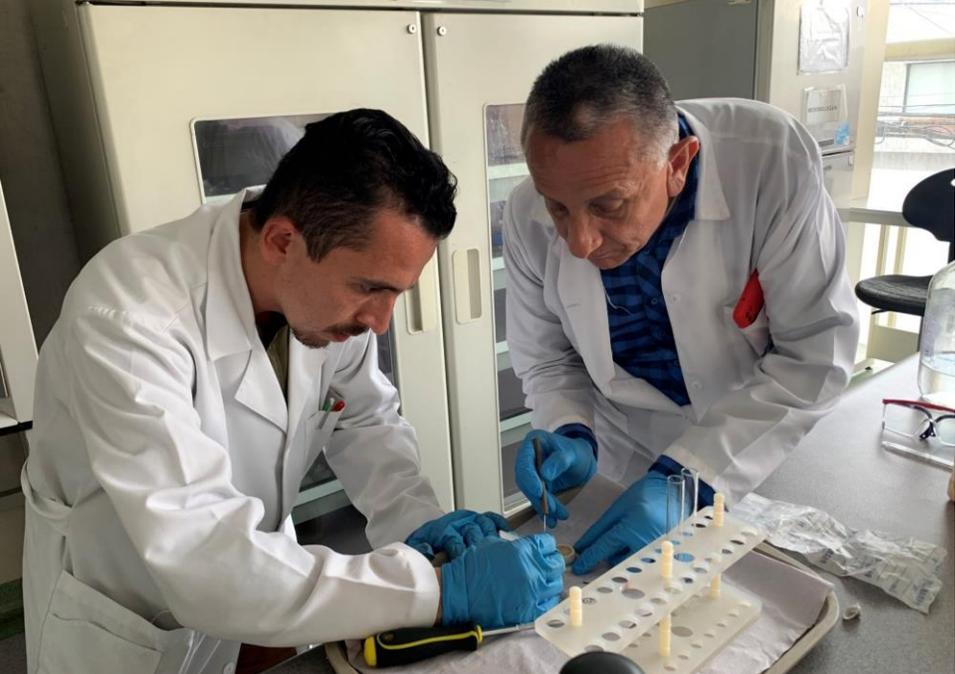


Foto 4. Rodrigo Pérez y Carlos Velásquez preparando muestras de la DGT para su análisis.



Foto 5. Extracción en fase sólida para análisis de pesticidas en muestras de agua.

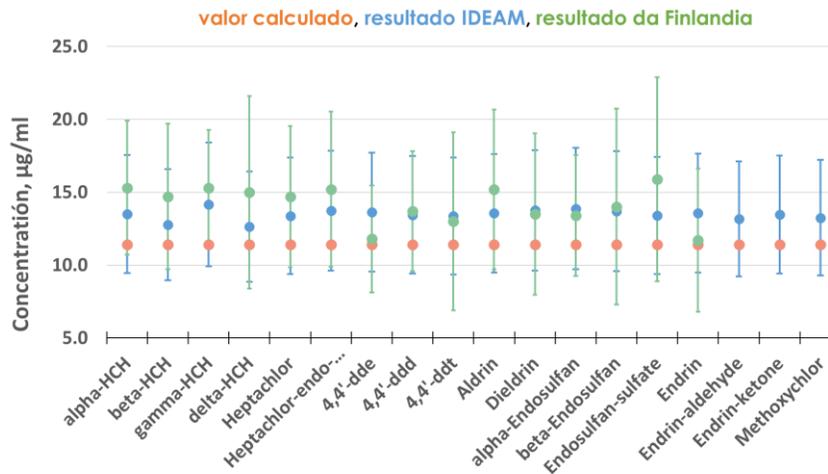
Pesticidas – Métodos de monitoreo y análisis

Desarrollo del método

- El método que utiliza el IDEAM para el análisis de pesticidas, los niveles de límite de cuantificación (LOQ) han sido relativamente altos y durante el proyecto se presentaron sugerencias sobre cómo reducir los límites. En general, es importante mantener los instrumentos analíticos en buenas condiciones con procedimientos regulares de monitoreo y limpieza. Para ello, Syke creó una sencilla guía de resolución de problemas para el instrumento GC-MS/MS que se utilizará en el IDEAM. De acuerdo con el IDEAM, han logrado bajar los LOQ en un orden de magnitud durante el proyecto.
- Syke ofreció al IDEAM un nuevo tipo de cartuchos SPE para pruebas de comparación de eficiencia de extracción. Los resultados mostraron solo pequeñas diferencias en la eficiencia de extracción dentro de las sustancias analizadas.
- Se realizó una comparación interlaboratorios entre dos laboratorios para el análisis de plaguicidas para obtener información del estado actual del método en el laboratorio del IDEAM (Figura 3).

Tratamiento y análisis de muestras en laboratorio del IDEAM en fotos 2-5.

Figura 3. Resultados de la comparación interlaboratorios, muestra D



Recomendaciones

El desarrollo del método debe continuar, prestando especial atención, especialmente en el mantenimiento del instrumento y el estado de la columna.

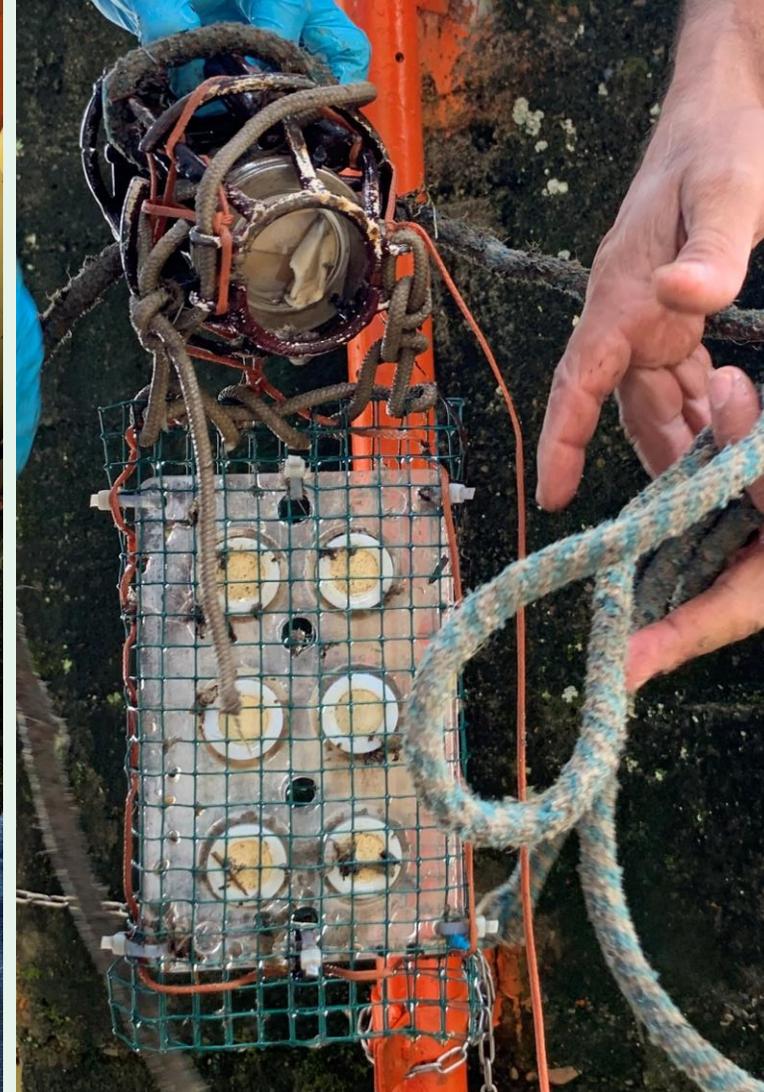


Foto 6. Diego Cortés recoge los muestreadores pasivos en la estación Paicol. Foto 7. Muestreadores pasivos después del despliegue.

Foto 8. Retirada de los muestreadores DGT del rack de incubación.

Despliegue de muestreo pasivo en la estación Paicol

La estación Paicol, el área piloto del proyecto COFI-Water, está ubicada al sur de Neiva, Huila, en el río Páez. El río Páez es un afluente del río Magdalena, que es el principal río de Colombia y desemboca finalmente en el mar Caribe.

Los muestreadores pasivos fueron colocados en la estación Paicol ya que se consideró un lugar seguro para los muestreadores (Foto 6). Se utilizaron dos tipos de muestreadores pasivos (DGT y Chemcatcher) (Fotos 7-9). Las muestras se recuperaron después de dos semanas de despliegue. Los pesticidas y los metales pesados se analizaron tanto en Finlandia como en el laboratorio del IDEAM.



Foto 9. Ofelia Angel empaqueta las muestras en bolsas etiquetadas.

Muestreo pasivo: Resultados del análisis de pesticidas

En los muestreadores pasivos DGT y Chemcatcher, analizados en Finlandia, se detectaron 19 pesticidas diferentes (Tabla 1). El número total de pesticidas analizados fue de 275. Desde el muestreador pasivo de DGT se detectaron tres pesticidas y uno de ellos se encontraba por debajo del límite de cuantificación (LOQ).

A partir del muestreador Chemcatcher se detectaron 17 pesticidas, cuatro de los cuales estaban por debajo del límite de cuantificación (LOQ). Solo se detectó triclosán en ambos tipos de muestreadores pasivos. El triclosán es un biocida y se utiliza en productos de cuidado personal como la pasta de dientes. En los muestreadores pasivos DGT y Chemcatcher, analizados en Colombia, las concentraciones de todos los pesticidas estaban por debajo del límite de cuantificación.

Tabla 1. Pesticidas detectados en muestreadores pasivos en la estación Paicol.

Pesticida	Pesticida DGT 1	Pesticida Chemcatcher 1	Pesticida DGT 2	Pesticida Chemcatcher 2
	FI	FI	CO	CO
	µg/muestra	µg/muestra	µg/muestra	µg/muestra
2,4-D	ND	<0.0025**	na	na
4-cloro-2-metilfenol	0.0027	ND	na	na
Atrazina	ND	0.0021	ND	ND
Azoxistrobina	ND	0.0014	na	na
2,6-dicloro-benzamida (BAM)	ND	<0.0025**	na	na
Dietiltoluamida (DEET)	0.2	ND	na	na
Dimetoato	ND	ND	ND	ND
Dimetomorfo	ND	0.0056	na	na
Dinoterb	ND	0.008	na	na
Diuron	ND	0.0033	na	na
Carbofurano	ND	<0.0013**	na	na
Clorpirifos	ND	0.0028	ND	ND
Clotianidina	ND	0.0029	na	na
Metalaxilo	ND	0.0084	na	na
Oxadiazon	ND	0.017	na	na
Pendimetalina	ND	0.0032	na	na
Propiconazol	ND	<0.0025**	na	na
Ciproconazol	ND	0.0031	na	na
Tiametoxam	ND	0.006	na	na
Triclosán	<0.0025**	0.009	na	na

** indica para la detección de concentración <LOQ, na = no analizado o análisis no disponible, **ND** = analizado, pero no detectado

Muestreo pasivo: análisis elemental

A partir de los muestreadores pasivos de metales DGT analizados en Finlandia, se descubrieron todos los metales/elementos analizados (Tabla 2). En el IDEAM se analizaron 10 elementos, de los cuales el Hg solo se analizó en el IDEAM. Tratamiento de muestras pasivo en laboratorio del IDEAM en fotos 10 y 11.

Las concentraciones medidas en el IDEAM fueron, en general, órdenes de magnitud superiores a las analizadas en Finlandia. Dado que no se realizó ninguna comparación entre laboratorios, es difícil decir si estas diferencias se derivan de los dispositivos pasivos de extracción o con el equipo usado en el análisis.



Foto 10. Extracción del muestreador pasivo en el laboratorio del IDEAM.



Foto 11. Transferencia del extracto del muestreador pasivo al tubo de análisis en el laboratorio del IDEAM.

Tabla 2. Concentración promediada en el tiempo de elementos en dos muestreadores pasivos metálicos de la DGT analizados en Finlandia y en el IDEAM.

Elemento	Resultado promedio de metal DGT 1 y 2	Concentración media de analito medida por DGT	Resultado promedio de metal DGT 3 y 4	Concentración media de analito medida por DGT
Analizado en	FI	FI	CO	CO
	ng/muestreador	C _{DGT} (ng/L)	ng/muestreador	C _{DGT} (ng/L)
Al	1300	9000	7900	55000
As	0.34	2.1	na*	na
Ba	260	na	na	na
Ca	320000	na	na	na
Cd	9.4	47	250	1400
Co	14	78	na	na
Cr	3.0	24	630	4100
Cu	47	220	5000	26000
Fe	550	3100	7500	40000
K	980	na	na	na
Mg	21000	na	na	na
Mn	4600	29000	7300	41000
Na	9700	na	na	na
Ni	49	260	630	3600
P	180	1300	na	na
Pb	0.83	3.2	630	2600
S	3900	4500	na	na
Se	0.54	na	na	na
Sr	660	na	na	na
Ti	5.4	na	na	na
U	10	na	na	na
V	3.2	14	na	na
Zn	120	650	5000	27000
Hg	na	na	130	500

*na = no analizado o análisis no disponible o sin coeficiente de difusión disponible



Foto 12. Diego Cortés toma una muestra de agua.

El muestreo de agua de agarre: Resultados del análisis de pesticidas

Se tomaron cuatro muestras de agua manuales de tres ríos colombianos (río Páez, río Neiva y río Magdalena, Fotos 12 y 13). Desde el río Neiva se tomaron dos muestras paralelas para monitorear la repetibilidad de los métodos utilizados. De las muestras analizadas en Finlandia solo se detectaron seis sustancias de las 275 analizadas (Tabla 3). En el IDEAM, no se detectaron pesticidas en las muestras de agua manuales.



Foto 13. A) Sitio de muestreo en el río Paéz, B) Muestra de agua trasladada a un recipiente utilizado C) para dividir la muestra en diferentes botellas.

Tabla 3. Pesticidas detectados en muestras de agua de agarre, su uso (B=biocida, H=herbicida, I=insecticida, F=fungicida), concentraciones predichas seleccionadas sin efecto (PNEC) de los mismos y concentraciones observadas en muestras de agua de agarre. Todas las concentraciones se expresan en $\mu\text{g}/\text{l}$.

Sustancia	CAS	Uso	PNEC	Río Páez, Estación Paicol	Río Neiva, Desembocadura (muestras paralelas)		Río Magdalena, Puente Santander
2,4-D	94-75-7	H	0.2 ^a	ND	ND	ND	0.012
Azoxistrobina	131860-33-8	F	0.55 ^b	ND	ND	ND	0.01
Diclorvos	62-73-7	I	0.0006 ^c	ND	0.002 ^g	0.002 ^g	ND
Dietiltoluamida (DEET)	134-62-3	B	50 ^d	<0.005 ^f	0.023	0.023	0.019
Oxadiazon	19666-30-9	H	0.088 ^e	ND	ND	ND	0.006
Tiametoxam	153719-23-4	I	0.04 ^f	ND	<0.010 ^f	<0.010 ^f	<0.010 ^f

a) El alemán AA-EQS (extraído de Weisner et al. 2022), b) Una propuesta sueca por el valor límite (Boström & Gönczi 2022), c) EU AA-EQS (Directive 2013/39/EU), d) PNEC estimado del dato disponible de la literatura (Siimes et al. 2019), e) El límite preliminar sueco para evaluar los resultados de la concentración de aguas superficiales (SLU & Agritox 2018), f) Propuesto AA-EQS (EU COM 2022), g) Concentración excede el valor PNEC, h) Sustancia detectada pero la concentración queda debajo del límite de cuantificación.

Utilización de los datos de caudal y calidad del agua de la estación de monitoreo hidrológico de Paicol

El proyecto adquirió una sonda multiparamétrica de medición de la calidad del agua (Hydrolab, HL7, Foto 15) que se instaló en la estación Paicol en el río Paéz en junio de 2022. La sonda incluye sensores para seis parámetros: turbidez, conductividad, oxígeno disuelto, temperatura, pH y sólidos en suspensión.

Los datos registrados por la sonda HL7 son recopilados por un registrador de datos (datalogger, Foto 14). La sonda y el datalogger se conectaron a través del protocolo de comunicaciones SDI-12 con un cable de instalación de 50 metros.

La estación Paicol fue seleccionada como área piloto debido a que i) está vigilada, ii) ya cuenta con una estación hidrológica, iii) el tamaño y las características del área de captación son adecuadas para aprender a utilizar la sonda multiparamétrica y iv) la información que proporciona, por ejemplo, para un posible modelado SWAT.

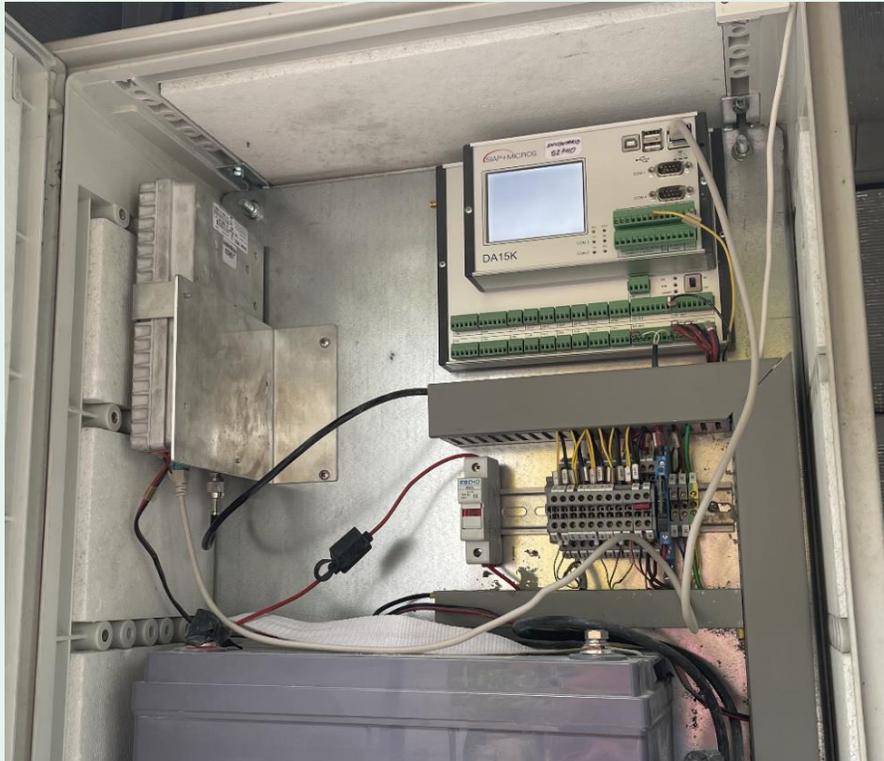


Foto 14. Registrador de datos (datalogger).



Foto 15. La sonda multiparamétrica (Hydrolab, HL7) se levantó del agua.

Series temporales de la estación de monitoreo de Paicol

El 22 de junio de 2022 se inició el monitoreo automático de la calidad del agua en la estación de Paicol y las mediciones aún están en curso. En la figura 4, presentamos los resultados hasta el 3 marzo de 2023. Durante este período, se tomaron tres muestras de agua del río con a la sonda HL7.

La turbidez medida por sensores, llamada “bruta” o “cruda” registrada en el momento del muestreo (7 de septiembre de 2022 a las 08:45, 14 de octubre de 2022 a las 08:45 y 14 de noviembre de 2022 a las 08:30) se graficó (abajo) contra la turbidez (NTU, Figura 5A), las concentraciones de sólidos suspendidos totales (TSS, mg/l, Figura 5B) y fósforo total (P_{tot} , $\mu\text{g/l}$, Figura 5C) determinadas a partir de las muestras de agua en el laboratorio.

Se formaron ecuaciones de regresión lineal sobre la base de las tres muestras y los registros de sensores correspondientes. Los coeficientes de determinación (R^2) de las tres ecuaciones fueron bastante altos (0,95-0,96). Sin embargo, el número de muestras es hasta ahora demasiado bajo para realizar cálculos fiables y se necesitan más muestras para confirmar la correlación.

Además, el plan es construir un modelo de cuenca SWAT para la cuenca del río Páez, en la que se encuentra la estación de monitoreo automático Paicol. Los resultados del modelo incluyen el flujo de agua y el transporte de sedimentos, nutrientes y pesticidas.

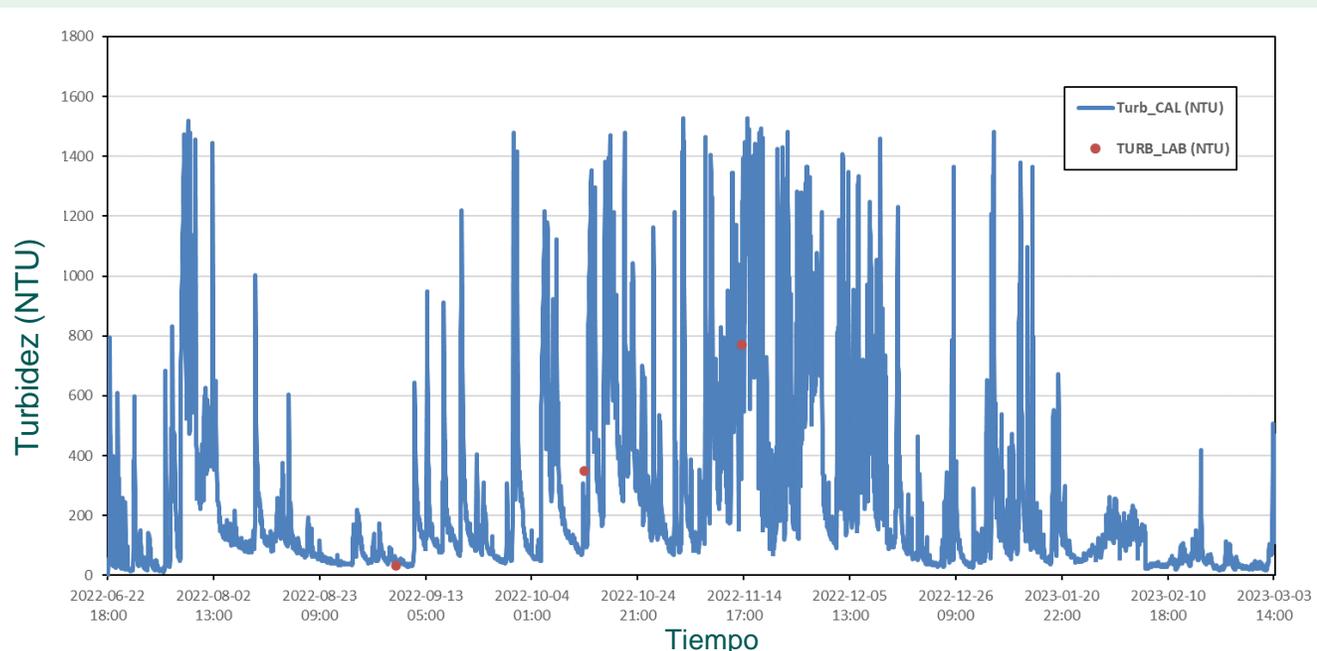


Figura 4. Serie temporal de turbidez en agua medida con sonda HL7 (Hydrolab).

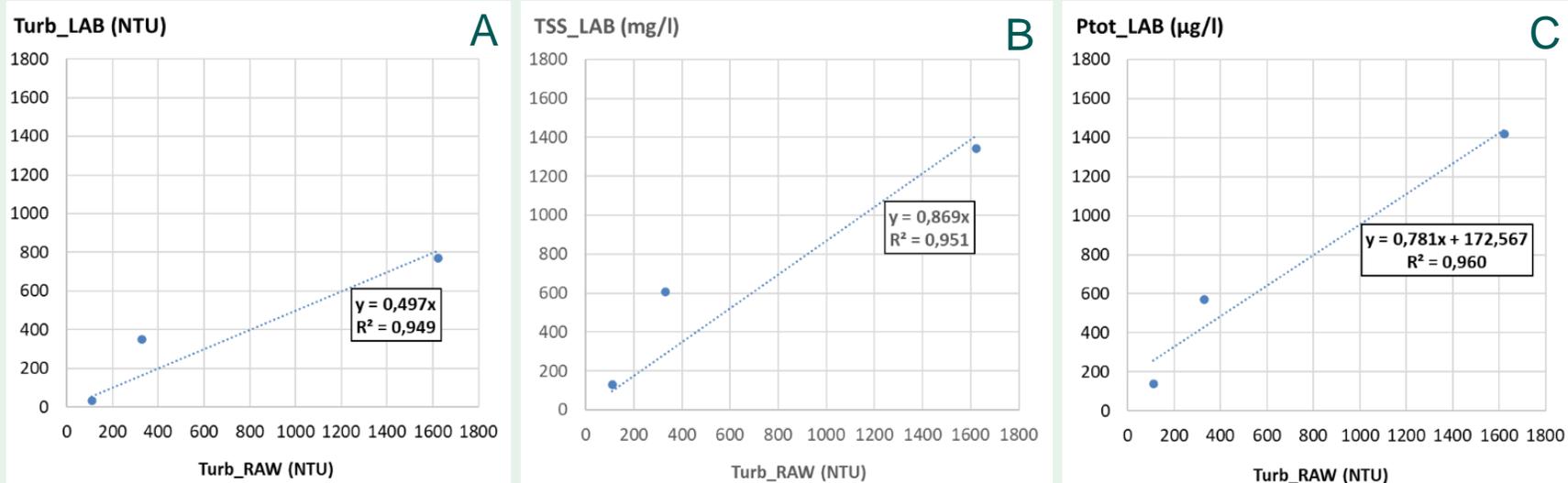


Figura 5. Correlaciones de turbidez medida con el sensor de la sonda HL7 y muestras analizadas en laboratorio.

A) Turbidez, B) Sólidos suspendidos totales, C) Fósforo total.

Recomendaciones

- Se necesitan más muestras para confirmar la fiabilidad de las ecuaciones.
- Los datos en línea se pueden utilizar como un sistema de alerta temprana para detectar emisiones, minería ilegal, etc.
- El modelo SWAT podría utilizarse para simular y predecir el transporte de nutrientes, sedimentos y pesticidas en el río Páez.
- Para ello es necesario disponer de diversos datos GIS (SIG en español), así como capacitar al personal del IDEAM para utilizar el modelo.

Uso de datos satelitales en el monitoreo de la calidad del agua

Datos satelitales

Los expertos de Syke demostraron el uso de datos satelitales en el área piloto. Utilizaron los datos de nivel 1 (L1C) del instrumento Sentinel-2 MSI. El instrumento proporciona datos con una resolución espacial de 10 metros para 13 bandas de diferentes longitudes de onda. La misión Sentinel-2 abarca los años 2016 en adelante, siendo el año 2015 la fase preoperativa.

Se accede a los datos a través de CloudAPI Sentinel-Hub, que proporciona el servicio de información de entidades (FIS) que se utiliza para calcular las estadísticas regionales diarias de cada una de las regiones determinadas.

Algoritmo de recuperación de turbidez

La fórmula numérica utilizada para recuperar las estimaciones de turbidez a partir de los datos crudos o brutos de nivel 1 del MSI de Sentinel-2 es un algoritmo de relación de banda simple basado en la banda roja (B4, longitud de onda central de 664,6 nm/ancho de banda de 31 nm) y la banda de aerosoles costeros (B1, 442,7 nm/21 nm).

B4 Rojo (665 nm) / B1 Ultra azul (443 nm)

Los coeficientes se calibraron utilizando un producto de turbidez validado en la región costera finlandesa (Mar Báltico, Europa) con un rango de turbidez de aproximadamente entre 0 y 60 FNU. Por lo tanto, las estimaciones de turbidez para esta zona piloto se basan en la extrapolación fuera del rango de entrenamiento del modelo.

Eliminación de la nube

Como el Sentinel-2 funciona en longitudes de onda ópticas, las nubes impiden observar el agua del río y deben ser eliminadas. La eliminación de nubes se basa en la banda de máscara de nube global (CLM) disponible en la plataforma Sentinel-Hub. Las nubes se identifican automáticamente para cada observación de Sentinel-2, y las observaciones con alta cobertura de nubes se eliminaron de la serie temporal.

Extrapolación de modelos y datos locales in situ

Los datos in situ proporcionados para las regiones de interés son escasos y solo hay unos pocos puntos de datos por región que coinciden con el cronograma de la misión Sentinel-2. Por lo tanto, los datos locales in situ no se pudieron utilizar para el entrenamiento del modelo. Aunque el ajuste del modelo es bueno, el modelo se entrenó utilizando datos de turbidez del Mar Báltico y se extrapoló a los ríos colombianos.

Si la composición del agua con respecto a los componentes de turbidez es drásticamente diferente a la del Mar Báltico, la extrapolación del modelo podría ser más incierta.

Figura 6. Validación del modelo

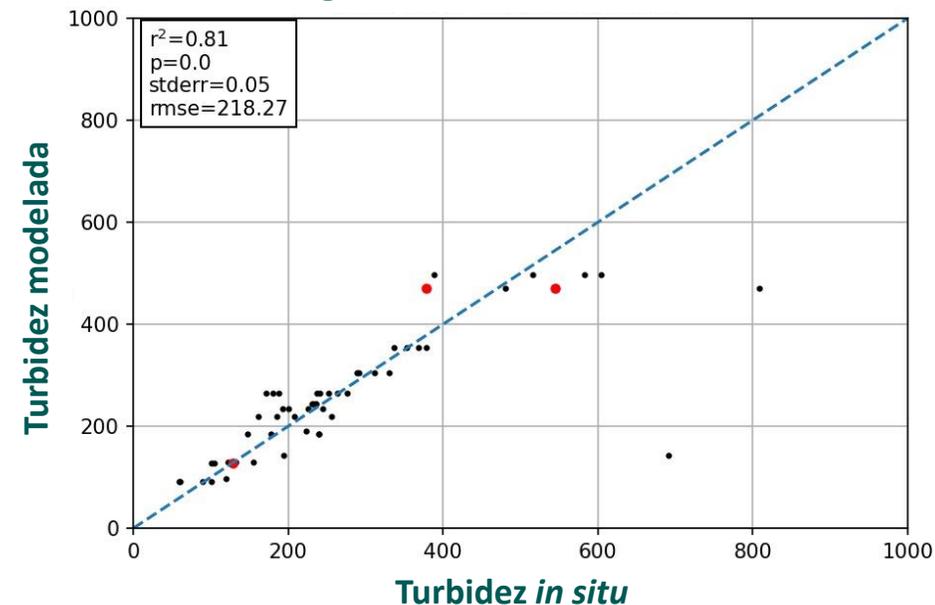
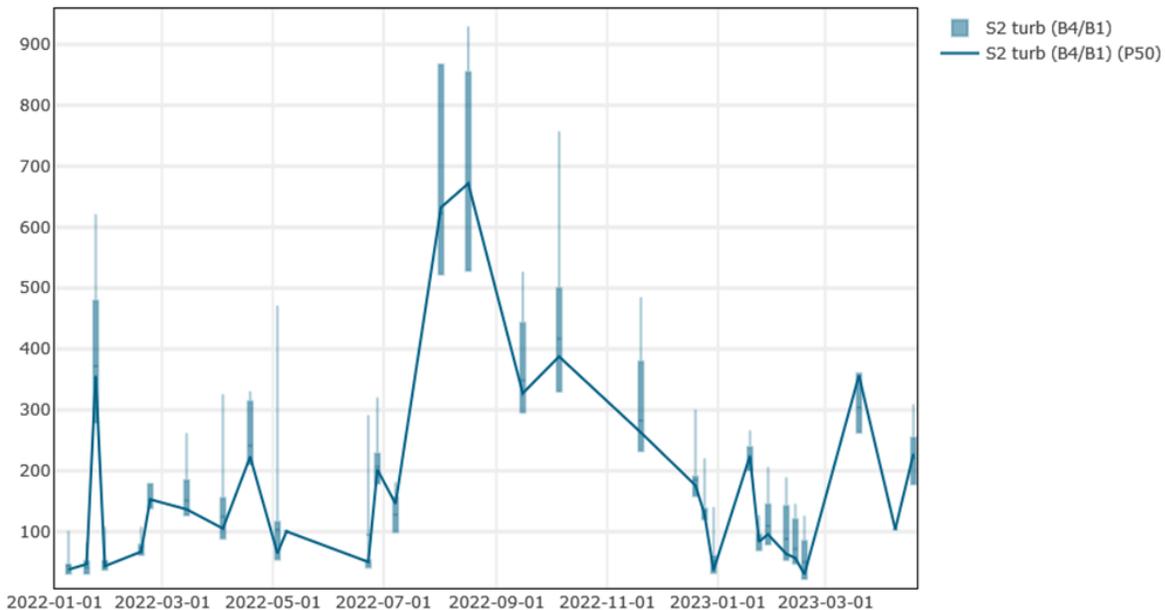


Foto 16. Ejemplo de un área utilizada por los datos satelitales en la estación Paicol.

RFS_COFI: 5_Paez



Efectos atmosféricos

Los datos de origen del algoritmo son datos de nivel-1, que no se corrigen para efectos atmosféricos. Dentro del alcance y los recursos de este proyecto, no se evaluaron algoritmos de corrección atmosférica relevantes para los ríos colombianos. En su lugar, se seleccionó un algoritmo de relación de banda para compensar los efectos atmosféricos. Se exploraron diferentes relaciones de bandas, y se seleccionó la de mejor rendimiento y se ajustó a los datos reales sobre el terreno.

El algoritmo estándar para corregir los efectos de la atmósfera en las observaciones sobre áreas terrestres (llamado Sen2Cor) no funciona de manera óptima en áreas acuáticas. Por este motivo se utilizaron algoritmos de relación de bandas (ver series de tiempo en la Figuras 7 y 8). Estos algoritmos suelen compensar parte de las diferencias, por ejemplo, composición de aerosoles entre los días de observación y ayudar a proporcionar resultados sólidos a lo largo de series temporales de observaciones.

La influencia del vapor de agua en la atmósfera en las latitudes de las regiones de interés no puede evaluarse sin más experimentación. Las incertidumbres podrían evaluarse proporcionando mediciones locales in situ adicionales y mitigarse mediante el desarrollo de algoritmos científicos.

Figura 7. Turbidez medida con datos satelitales en la estación de medición virtual 5 en el río Paéz durante 2022-2023.

RFS_COFI: PAICOL_Paez

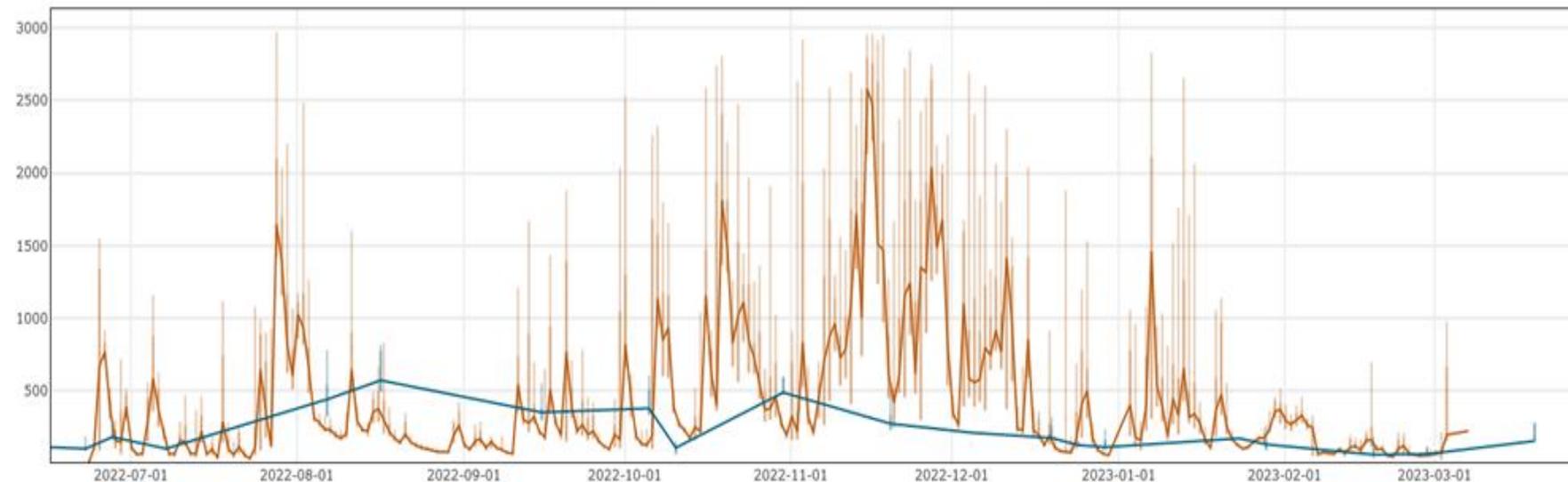


Figura 8. Mediciones continuas de turbidez (línea marrón) combinadas con datos satelitales en la estación Paicol (línea azul).

Recomendaciones

- Las incertidumbres podrían mitigarse proporcionando mediciones locales adicionales de la turbidez in situ con coordenadas de muestreo precisas y una cobertura temporal más densa (por ejemplo, una campaña de medición específica).
- Los sitios de muestreo deben estar ubicados en los segmentos del río, preferiblemente de más de 200 metros de ancho y 300 metros de largo, y lo suficientemente profundos como para que el lecho del río no sea visible a través del agua turbia.
- La precisión de las coordenadas de muestreo es crucial para los ríos con aguas muy separadas (alta turbidez por un lado, baja turbidez por el otro).
- Las trayectorias de Sentinel-2 son escasas en esta latitud, por lo que el desarrollo de modelos se beneficiará de series temporales in situ más largas.

Aprendizaje entre iguales

En 2018, colegas finlandeses y colombianos se conocieron y planificaron juntos el proyecto COFI-Water. El proyecto comenzó en 2019 y luego los expertos de Syke visitaron, el área piloto en Neiva. En la primavera de 2020, se organizó una capacitación de casi 2 semanas centrada en el laboratorio y su garantía de la calidad.

Después de eso, la prohibición de viajar causada por la pandemia de Covid-19 acostumbró a los equipos a trabajar de forma remota. Las reuniones del proyecto, las reuniones de la Junta del Proyecto y las capacitaciones se organizaron con la ayuda de sistemas de reuniones virtuales. Con sesiones de entrenamiento que duraron entre 2 a 3 horas. Se proporcionaron traducciones del español al inglés y todas las presentaciones se hicieron en ambos idiomas. Los documentos y las presentaciones se compartieron a través de servicios en la nube.

En otoño de 2022, cuando la situación sanitaria era favorable, Syke organizó un viaje de estudios intensivo de una semana a Finlandia. Se llevó a cabo un trabajo minucioso en el área de Helsinki. En ese momento, era posible organizar demostraciones de análisis de calidad del agua y trabajo de campo tanto en el laboratorio como en condiciones de campo. La excursión a la planta de tratamiento de aguas residuales de alta tecnología que abastece a Helsinki y sus municipios cercanos, construida dentro del lecho rocoso, fue una experiencia emocionante.

En la primavera de 2023, los expertos de Syke visitaron el IDEAM en Bogotá y Neiva en dos grupos. Durante el viaje del primer grupo, se instalaron muestreadores pasivos y, después de dos semanas, el segundo grupo llevó los muestreadores al laboratorio.

Durante estos viajes, se planificaron informes sobre los Productos del proyecto y las acciones para completarlo.

Foto 17. Como actividad nocturna del viaje de estudios, conocer la Fortaleza Marina de Suomenlinna frente a Helsinki en Finlandia.



Monitoreo, evaluación y presentación de informes

La red actual de monitoreo de la calidad del agua administrada por el IDEAM consta de 148 puntos de muestreo, los cuales cuentan con una frecuencia de muestreo manual de 1 a 2 veces al año. Los resultados se publican en el boletín anual y cada cuatro años en la publicación denominada "Estudio Nacional del Agua - Ena". Los recursos limitados determinan la extensión de la red de monitoreo y el número de muestras que se tomarán anualmente, así como las variables que se monitorearán.

Al actualizar el programa de monitoreo para los próximos años, se recomienda tener en cuenta el propósito específico del monitoreo y cuál es el papel y las responsabilidades de los diversos actores.

Un sistema común de información abierto y las herramientas de presentación de informes relacionadas con este son esenciales para compartir información actualizada y de alta calidad.

A largo plazo, el objetivo común de los actores podría ser, además de compartir información específica del sitio, preparar un mapa del estado de las aguas como en la Figura 9, donde las aguas superficiales se muestran coloreadas de acuerdo con cinco categorías de estado diferentes.

Los Estados miembros de la Unión Europea, incluido Finlandia, siguen directrices que tiene en común para evaluar el estado ecológico de las aguas ([Directiva Marco del Agua - Comisión Europea \(europa.eu\)](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=CELEX%3A32000/0100)). Finlandia ha utilizado un método de presentación similar desde principios de la década de 1970, y desde la década de 2000, de conformidad con las directrices de la UE. Las masas de agua se delimitan según su tipología. Se han establecido condiciones de referencia para cada tipo de agua. La clasificación del estado se evalúa mediante elementos biológicos (variables). Los elementos físico-químicos, hidrológicos y morfológicos juegan un papel de soporte en esta clasificación.

La presentación del estado de las aguas en zonas (km²) y longitudes (km) ha sido bien recibida en los medios de comunicación y entre la ciudadanía. También ayuda a los responsables de la toma de decisiones a comprender el estado de las aguas superficiales y hacia dónde deben dirigirse las medidas para aliviar el efecto de las presiones de las acciones humanas (emisiones, cambios hidrológicos y morfológicos).

La legislación debe apoyar el seguimiento de las presiones de acciones humanas sobre las aguas superficiales y la aplicación de medidas para reducirlas.

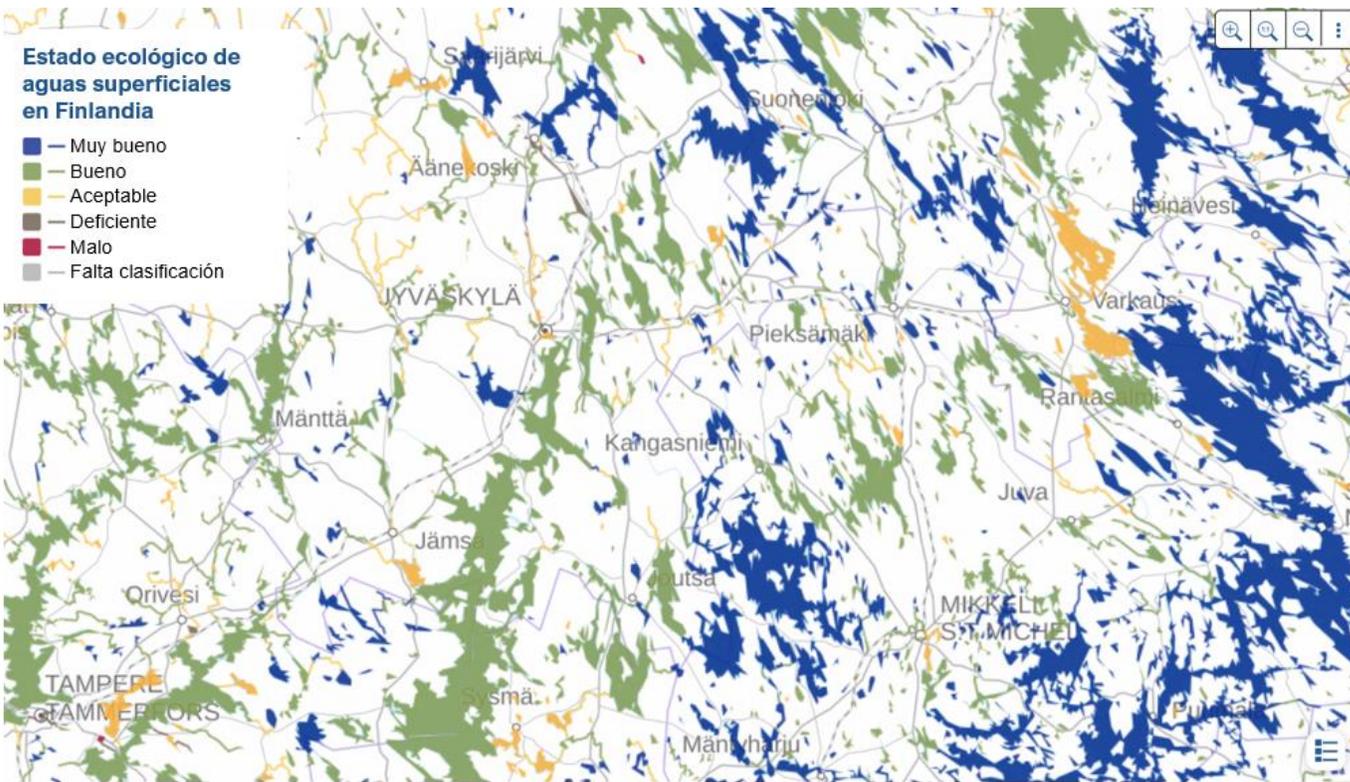


Figura 9. En Finlandia, las aguas superficiales (ríos, lagos, aguas costeras) se clasifican según su estado ecológico cada seis años. La imagen muestra parte de Finlandia. El mapa de toda Finlandia se puede ver en detalle en la página web [Source of research-based information on water \(vesi.fi\)](https://vesi.fi) Map service.



Recomendaciones

- Al actualizar el programa de monitoreo para los próximos años, se recomienda tener en cuenta el propósito específico del monitoreo y cuál es el papel y las responsabilidades de los distintos actores..
- Un sistema común de información abierto y las herramientas de presentación de informes relacionadas con este son esenciales para compartir información actualizada y de alta calidad.

Resumen del Syke

El Instituto Finandés de Medio Ambiente (Syke), bajo los auspicios del Ministerio de Medio Ambiente y del Ministerio de Agricultura y Silvicultura, es a la vez un instituto de investigación y un centro de conocimientos ambientales. Syke es el centro nacional de investigación y desarrollo de la administración ambiental de Finlandia.

Syke es responsable de llevar a cabo la investigación, el monitoreo y la evaluación ambiental, publicar y difundir los resultados y mantener los sistemas de información adecuados. En Finlandia, el monitoreo de la calidad del agua comenzó en la década de 1960 y Syke ha continuado el desarrollo del monitoreo y la evaluación desde su creación en 1995 como sus predecesores tiempo antes.

Los expertos de Syke y su campo de especialización

Sari Mitikka, monitoreo y evaluación
Riitta Koivikko, experta de laboratorio, control de calidad
Teemu Näykkki, control de calidad, MUKit
Sirikka Tattari, monitoreo en línea
Jari Koskiahho, monitoreo en línea y modelo SWAT
Heidi Ahkola, muestreo pasivo
Katri Siimes, pesticidas y otras sustancias nocivas
Marja Hagström, química
Jenni Attila, observación de la Tierra
Vesa Keto, observación de la Tierra
Eeva Bruun, observación de la Tierra
Juan Sebastián Cotrino Salcedo, traductor e interprete

Resumen del IDEAM

El Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM), el cual fue creado en 1993, es una entidad del gobierno colombiano vinculada al Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Es responsable de la gestión de la información científica, hidrológica, meteorológica y ambiental en Colombia. El IDEAM administra bases de datos meteorológicos e hidrológicos en el país, recopila información y da pronósticos, alertas y asesoría a la población sobre el comportamiento climático. Se encarga de monitorear los recursos biofísicos del país en asuntos relacionados con su contaminación y degradación; crucial para las decisiones tomadas por las autoridades ambientales.

Expertos del IDEAM

Fabio Bernal, Subdirector de Hidrología
Nelson Omar Vargas
Claudia Ávila Laverde, Jefa del Grupo de Laboratorio Ambiental
Carlos Martín Velásquez Ramírez, químico, líder técnico del Laboratorio de Calidad Ambiental
Rodrigo Pérez Rodríguez, químico
María Constanza Rosero Mesa, Observación de la Tierra
Claudia Nicole Tetay, monitoreo y evaluación
Nury Alejandra Mesa, experta de laboratorio
Danilo Uasapud, monitoreo de la calidad del agua
Ofelia Angel Oviedo, jefa del área operativa 4 en Neiva
Diego Cortés, técnico del área operativa 4 en Neiva
Elisabeth González Mateus, química

Contacto

Líder de proyecto en Syke

Sari Mitikka
Investigadora Científica Senior, limnóloga
Instituto Finandés de Medio Ambiente (Syke)
Soluciones Marinas y de Agua Dulce, Agua Dulce y Gestión Marina
Helsinki, Finlandia
www.syke.fi | www.environment.fi

Coordinadora de proyectos en el IDEAM

Claudia Ávila Laverde
Coordinadora
Laboratorio de Calidad Ambiental
www.ideam.gov.co

[Proyecto COFI-Water \(IDEAM.gov.co\)](http://ProyectoCOFI-Water(IDEAM.gov.co))

[Página web del proyecto COFI Water – Syke.fi](http://PáginawebdelproyectoCOFIWater-Syke.fi)



Suomen ympäristökeskus
Finlands miljöcentral
Finnish Environment Institute





Suomen ympäristökeskus
Finlands miljöcentral
Finnish Environment Institute



SUOMI
FINLAND

Publicado por: Instituto Finlandés de Medio Ambiente (Syke)
Año de publicación: 2024
Fotos: Riitta Koivikko, Jari Koskiahho, Marja Hagström