

El biólogo y su rol investigativo en bioindicadores de la salud ambiental

The biologist and his research role in bioindicators of environmental health

<https://doi.org/10.52808/bmsa.7e6.624.001>

Camila Alejandra Traverso Castillo ¹

<https://orcid.org/0000-0002-0258-4009>

Marco Fabriccio Traverso Huarcaya ¹

<https://orcid.org/0000-0003-2617-7667>

Michelle Norma Antonio ²

<https://orcid.org/0000-0003-0042-800X>

María Nelly Castillo Rodríguez ^{1,*}

<https://orcid.org/0000-0003-0173-915X>

Recibido: 03/04/2022

Aceptado: 30/06/2022

RESUMEN

El planeta se enfrenta a una triple emergencia medioambiental ligada al cambio climático, la contaminación y cambios en la biodiversidad, las cuales, suponen una seria amenaza para la humanidad, causando casi 9 millones de muertes prematuras por año. Es necesario identificar las herramientas y los actores que posean el alcance y las competencias, respectivamente, para ejecutar la teoría y la práctica en la evaluación, corrección, control y prevención de los retos que engloban esta triple emergencia medioambiental. Dentro del grupo de actores interdisciplinarios que han abordado estos retos medioambientales, los biólogos se destacan por sus competencias en el estudio científico de los seres vivos y los procesos naturales que siguen todos los seres vivos, integrando ramas interdisciplinarias como la química y la física. En este Fórum exploramos el rol investigativo del biólogo en bioindicadores de la salud ambiental, referenciando ejemplos relevantes de biólogos que buscan medir la salud y deterioro ambiental de los ecosistemas a través de los datos recogidos en los ambientes acuáticos, atmosféricos o en el suelo, mediante bioindicadores enfocados a detectar exposición, a determinar consecuencias biológicas de carácter adverso, o para evaluar cambios en procesos de bioremediación.

Palabras clave: Biólogo, bioindicadores, salud ambiental, cambio climático, contaminación, biodiversidad.

ABSTRACT

The planet is facing a triple environmental emergency linked to climate change, pollution and changes in biodiversity, which pose a serious threat to humanity, causing almost 9 million premature deaths per year. It is necessary to identify the tools and actors that have the scope and skills, respectively, to implement theory and practice in the evaluation, correction, control and prevention of the challenges that encompass this triple environmental emergency. Within the group of interdisciplinary actors that have addressed these environmental challenges, biologists stand out for their skills in the scientific study of living beings and the natural processes that all living beings follow, integrating interdisciplinary branches such as chemistry and physics. In this Forum, we explore the investigative role of the biologist in bioindicators of environmental health, referencing relevant examples of biologists who seek to measure the health and environmental deterioration of ecosystems through data collected in aquatic, atmospheric or soil environments, through bioindicators focused on detecting exposure, to determine adverse biological consequences, or to evaluate changes in bioremediation processes.

Keywords: Biologist, bioindicators, environmental health, climate change, pollution, biodiversity.

¹ Universidad Continental. Huancayo, Perú.

² Universidad de Valencia. Valencia, España.

*Autor de Correspondencia: mcastillo@continental.edu.pe

Introducción

El planeta se enfrenta a una triple emergencia medioambiental ligada al cambio climático, la contaminación y cambios en la biodiversidad, las cuales, según el último informe presentado por la ONU, (2021) suponen una seria amenaza para la humanidad, causando casi 9 millones de muertes prematuras por año, una cifra que duplica los fallecimientos a causa del Sars-Cov-2 en el mismo lapso, triplica la letalidad provocadas por enfermedades tales como sida, malaria y tuberculosis; y a su vez, multiplica por 15 las muertes ocasionadas por las guerras, los asesinatos y otras formas de violencia (Korc & Hauchman, 2021; ONU, 2021).

Esta causalidad se enmarca dentro del estudio de la salud ambiental, la cual “comprende aquellos aspectos de la salud humana, incluyendo la calidad de vida, que son determinados por factores físicos, químicos, biológicos y psicosociales en el ambiente”, pero además, incluye la “evaluación, corrección, control y prevención de aquellos factores ambientales que pueden afectar negativamente la salud de generaciones presentes y futuras” (OPS, 2020). En ese contexto, y considerando el llamado de urgencia hecho por ONU, en la voz de su secretario general, es necesario identificar las herramientas y los actores que posean el alcance y las competencias, respectivamente, para ejecutar la teoría y la práctica

en la evaluación, corrección, control y prevención de los retos que engloban esta triple emergencia medioambiental: el cambio climático, la contaminación y cambios en la biodiversidad (OPS, 2020; ONU, 2022).

Dentro del grupo de actores interdisciplinarios que han abordado estos retos medioambientales, los biólogos se destacan por sus competencias en el estudio científico de los seres vivos y los procesos naturales que los engloban, integrando ramas interdisciplinarias como la química y la física; pero además, por su rol investigativo en bioindicadores de la salud ambiental, es decir, aquellas medidas a nivel celular, bioquímico o molecular de un organismo que se relacionan a cambios medioambientales y/o exposición a contaminantes (Domínguez, 2020; Lotrecchiano *et al.*, 2022).

A continuación, exploramos el rol investigativo del biólogo en bioindicadores de la salud ambiental, referenciando aquellos que buscan medir la salud y deterioro ambiental de los ecosistemas a través de los datos recogidos en los ambientes acuáticos, atmosféricos o en el suelo, mediante bioindicadores enfocados a detectar exposición, a determinar consecuencias biológicas de carácter adverso, o para evaluar cambios en procesos de bioremediación.

Cambio climático y contaminación del aire

El cambio climático es la mayor amenaza para la salud mundial en el presente siglo, a través de impactos directos (olas de calor, sequías, tormentas fuertes y aumento del nivel del mar) e impactos indirectos (enfermedades de las vías respiratorias y las transmitidas por vectores, inseguridad alimentaria y del agua, desnutrición y desplazamientos forzados). El incremento de la emisión de CO₂ es inductor del calentamiento global que deriva en el cambio climático, mientras que la generación de otros contaminantes como los óxidos de nitrógeno (NO y NO₂), los óxidos de azufre (SO₂ y SO₃) o las partículas en suspensión (PM), es la principal responsable de que el aire esté contaminado, especialmente en áreas metropolitanas donde la concentración de fábricas industriales, plantas de energía y calor, instalaciones locales de calefacción y zonas de elevado tráfico vehicular forman parte integral de su funcionamiento (Paoli *et al.*, 2018; Lucheta *et al.*, 2019; Rola *et al.*, 2019).

De acuerdo a las estimaciones de la OMS, (2022) nueve de cada diez personas respiran aire con altos niveles de contaminantes, causando un estimado de siete millones de muertes relacionadas con la contaminación de aire ambiental y doméstico. La exposición a largo plazo de particulado con tamaño promedio inferior a 2,5 µm se encuentra asociada a un aumento significativo de enfermedades respiratorias, cardiovasculares y cáncer de pulmón (Ezzati *et al.*, 2002; Cohen *et al.*, 2005; Laden *et al.*, 2006; Krewski *et al.*, 2009; Pope *et al.*, 2009; Lim *et al.*, 2012; OMS, 2021), mientras que la presencia de gases tóxicos como óxidos de azufre, de carbón y nitrógeno provocado por la combustión vehicular se han relacionado con alto potencial cancerígeno y otras afecciones (Massimi *et al.*, 2021; OMS, 2021; Zabati, 2022). Por lo tanto, el rol del biólogo como investigador es vital a fin de evaluar la exposición individual o colectiva, y poder asociarla a los contaminantes aéreos y prevenir daños tempranos.

En ese sentido, el estudio de tejidos y fluidos corporales han resultado confiables como bioindicadores enfocados a la caracterización y gestión de riesgo a la población humana (Lotrecchiano *et al.*, 2022). Torres Ordoñez *et al.*, (2021) usaron la medición de la saturación de Carboxihemoglobina en sangre (COHb) como bioindicador de exposición ocupacional al monóxido de carbono, un reconocido contaminante del aire en interiores producto de la combustión ineficiente de elementos como la madera o el carbón. Estos investigadores encontraron una correlación entre la duración de la jornada de fogoneros (6 ó más horas) y su tiempo de labores (2 ó más años) con valores sanguíneos de COHb superiores al 20%, en detrimento de la salud humana, ante lo cual se propusieron cambios de ingeniería sanitaria donde la actividad de combustión de material sólido provoca altas concentraciones y previa exposición continuada, mediante diseños arquitectónicos que mejoren la ventilación y extracción de las emisiones (Torres Ordoñez *et al.*, 2021).

Ahora bien, la investigación en bioindicadores de la salud ambiental también se ha enfocado en la búsqueda y determinación de especies sensibles a las concentraciones de contaminantes aéreos, como alternativas ante los altos costos, necesidad mantenimiento y dificultad de transporte de los sistemas de monitoreo convencionales. Según múltiples estudios, los procesos fisiológicos del talo líquénico son muy sensibles a las concentraciones de contaminantes, acumulando una amplia gama de estos y respondiendo de manera diferente según el agente contaminante y las condiciones estacionales, ya que en periodos secos, los líquenes tienden a concentrar estos contaminantes en sus tejidos, mientras que, en los periodos lluviosos, tienden a filtrarse de los mismos, logrando un equilibrio dinámico a muchos de los contaminantes que están expuestos (Boopeng *et al.*, 2018; Massimi *et al.*, 2021). Considerando la amplia distribución de líquenes, su adaptabilidad a diferentes entornos, y su capacidad de acumular diversos agentes contaminantes, múltiples especies líquénicas se han utilizado como bioindicadores de las condiciones atmosféricas y la contaminación en gran variedad de áreas (Timoteo Cornejo, 2022), las cuales incluyen: áreas industriales contaminadas (Pinho *et al.*, 2017; Boopeng *et al.*, 2018; Malaspina *et al.*, 2018; Massimi *et al.*, 2019; Rola *et al.*, 2019; Serrano *et al.*, 2019; Klapstein *et al.*, 2020; Massimi *et al.*, 2021), centros urbanos con importantes fuentes de contaminación (Varela *et al.*, 2018; Manninen, 2018; Marié *et al.*, 2018; Massimi *et al.*, 2019; Parviainen *et al.*, 2019; Zhao *et al.*, 2019; Correa-Ochoa *et al.*, 2020; Massimi *et al.*, 2021), áreas naturales con influencia de tráfico vehicular elevado (Huang *et al.*, 2019), áreas cercanas a vertederos (Paoli *et al.*, 2018; Sujetovienè *et al.*, 2019), áreas naturales y boscosas con perturbación antropogénica (Agnan *et al.*, 2017; Benítez *et al.*, 2018; Kłós *et al.*, 2018; Vannini *et al.*, 2021) y áreas con influencia natural y urbana, donde se midió el nivel de antropopresión (Lucheta *et al.*, 2019; Dresler *et al.*, 2021).

A su vez, Blanco Obregón, (2018) encontró que el algodoncillo proveniente del árbol de ceibo (*Ceiba* sp.) podría actuar también como indicador cualitativo de calidad ambiental del aire, ya que el color de éste varía según las diversas partículas del entorno. Además, este mismo algodoncillo, puede ser utilizado como indicador cuantitativo ya que tiene la particularidad de retener al plomo atmosférico, proveniente de diversas fuentes, pero en especial del campo vehicular (Blanco Obregón, 2018).

Por otra parte, se debe considerar que la presencia de metales pesados es, en algunos casos, esencial para plantas y ciertos organismos cuando su concentración es relativamente baja, pero cuando aumentan su concentración pueden ser altamente nocivos. En el caso Cd, Hg o Pb, no desempeñan ninguna función biológica y, al contrario, son altamente tóxicos (Ortiz *et al.*, 2007), siendo una amenaza patente en la biota, la biodiversidad y alteración de los servicios ecosistémicos (Vannini *et al.*, 2021). Alcalá *et al.*, (2008) analizaron evidencia de metales pesados, tales como: Ni, Cu, Co, V, Ti, Pb y Cd en vegetación arbórea como indicador de la calidad ambiental urbana en Chihuahua, México. Para ello evaluaron el material foliar de 75 árboles a diferentes estaciones del año: otoño, primavera y verano en sitios de muestreo también diferentes: comercial y servicios, industria mixta y pesada, residencial clase media-alta y residencial popular. Los resultados encontrados demostraron que el Ciprés, *Cupressus arizonica*, fue la especie arborea con mayor capacidad de retención de estos metales pesados, en zonas residenciales populares en la estación de otoño; mientras que en primavera, la mayor de determinación de metales se encontró en la zonas industriales pesada en el mismo tipo de árbol, lo que da cuenta del uso asertivo de bioindicadores, en este caso diferentes tipos de árboles, para dictar políticas a favor de una salud ambiental en un área adecuada (Alcalá *et al.*, 2008).

Contaminación de los suelos

Cambiando de escenario, es importante referirse a la contaminación de los suelos. La misma, parece invisible, pero compromete, y de manera importante, la calidad y cantidad de los alimentos que hoy en día consumimos, del agua de los ríos y mares del planeta e inclusive de la calidad del aire que respiramos, poniendo en situación vulnerable la salud humana y medioambiental. La actividad humana, como los procesos industriales, el mal manejo de los residuos, la sobre-explotación minera, la mala gestión de los residuos, los derrames químicos y petroleros, las centrales nucleares y las guerras armadas son los principales agentes contaminantes del suelo y de los ecosistemas circundantes. Pero la contaminación, no es solo local, se distribuye por todos los medios, especialmente los fluviales y los aéreos transportando, en su camino, sedimentos y elementos particulados contaminantes. Así mismo, la calidad del suelo se define como “la capacidad continua del suelo para funcionar como un ecosistema vivo y en continuo movimiento que sostiene plantas, animales y humanos”. Ahora bien, como todo ser vivo, la salud de éste se diagnostica midiendo algunas propiedades del mismo que dan pistas sobre qué tan bien puede funcionar. Esas propiedades son los llamados indicadores, que incluyen los físicos, químicos y biológicos. Dentro de los primeros se incluyen al pH, la densidad aparente, la capacidad máxima de retención de agua, materia orgánica, carbón activo y capacidad de intercambio catiónico, micro y macro elementos; los cuales pueden actuar de manera independiente o pueden actuar entre ellos mejorando o suprimiendo la salud del suelo (Olorunfemi *et al.*, 2016; Libohova *et al.*, 2018; Xu *et al.*, 2022).

Por otra parte, la biodiversidad de los suelos es muy variada y amplia, e incluye tanto especies microbióticas (bacterias, hongos, protozoarios) como mesobióticas (microartrópodos, nematodos). Estos últimos son más favorables como indicadores de la salud de los suelos por su ciclo de vida variable mucho más largo (entre días y años) que el de los microbios metabólicamente activos (de horas a días). Sus poblaciones también son más estables y sin fluctuaciones temporales por liberaciones efímeras de nutrientes. Estos nematodos también se destacan por su relación estrecha con algunos parámetros químicos (como Cd) y físicos del suelo, favorecido con ciclos reproductivos que conllevan a una mayor proporción de huevos latentes en condiciones de sequedad que eclosionan posteriormente en condiciones idóneas de humedad y temperatura (León *et al.*, 2022). Su estudio e identificación biológica los hace susceptibles de ser buenos indicadores adecuados de calidad sanitaria referente a los suelos francos y arenas.

Baretta *et al.* (2006) aplicaron un análisis multivariado en suelos cultivados de Brasil, con importantes resultados en la evaluación del medio edáfico de diferentes ecosistemas, mediante la utilización de ácaros y colémbolos como indicadores biológicos de la estabilidad y la fertilidad del suelo, determinando la sensibilidad de diferentes familias de ambos grupos a las perturbaciones del medio. (Baretta *et al.*, 2006).

Socorrás (2013) evaluó las relaciones entre los grupos de la mesofauna del suelo en pastizales con diferentes manejos y perturbaciones (pastoreo tradicional, pastoreo intensivo y quema) en las provincias cubanas de de Mayabeque y Matanzas, encontrando que los grupos más afectados fueron los colémbolos y los gamasinos, indicadores de la estabilidad y la fertilidad del suelo debido a que son muy susceptibles a las perturbaciones del medio por tener cuerpos blanquecinos y blandos; ello permitió hacer una evaluación de los métodos y la necesidad de recomendar el cambio de práctica pecuaria (Socorrás, 2013).

Etewa *et al.* (2016), en la gobernación de Sharkyia (Egipto), lograron correlacionar la prevalencia y distribución de nemátodos parásitos (*Toxocara* spp. y *Balantidium coli*) con algunos factores fisicoquímicos que afectan las muestras de suelo examinados. El diagnóstico de geohelminths se confirmó mediante la recuperación de sus huevos y larvas con

otros protozoos por diferentes métodos parasitológicos, y estos fueron más numerosos en suelos de zonas rurales y en orilla de canales de ríos (Etewa *et al.*, 2016).

Mediante una revisión sistemática, Manjarrez *et al.*, (2019) propusieron la inclusión de parásitos como *Ancylostoma* sp., *Strongyloides* sp. y *Taxocara* sp. como indicadores de la calidad sanitaria de la arena en en playas turísticas, sugiriendo que la supervisión de arena en busca de nemátodos debe realizarse junto al monitoreos de las bahías usando protocolos estandarizados que permitan las comparaciones entre regiones y la correspondiente intervención medioambiental (Manjarrez *et al.*, 2019).

Contaminación del agua

Asimismo, como parte de la salud integral de los ecosistemas, los ambientes acuáticos deben también ser tomados en cuenta. La extensión, complejidad y severidad de la contaminación en ambientes lacustres, fluviales y marítimos es a menudo muy dificultosa, y los análisis químicos podrían ser no suficientemente específicos para mostrar los complejos efectos que pueden suscitarse en estos ambientes contaminados. Por lo tanto, es vital el rol biologicista en la investigación de especies nativas que podrían ser valiosas herramientas para determinar el efecto de los contaminantes, puesto que la integridad de la biota suele dar indicios de la salud de un ecosistema específico, tomando en cuenta los organismos que allí habitan.

En este contexto, los peces son considerados especies representativas de la salud acuática de los ecosistemas, ya que integran los efectos de muchos contaminantes que actúan sobre el ecosistema y reflejan los impactos secundarios del estrés crónico, ya que tienen la capacidad de biomarcador, biomagnificar y bioacumular cualquier contaminante esparcido en los lechos acuáticos. Pustiglione Marinsek *et al.*, (2018) evaluaron las alteraciones morfofisiológicas y entéricas en peces de las especies *S. testudineus* en aguas con diferencias en su calidad ambiental, determinando alteraciones en las branquias y el tracto gastrointestinal de los animales recolectados en aguas contaminadas, como la reducción de la densidad de la túnica muscular, y el aumento de las células calciformes y linfocitos intraepiteliales; por lo cual, los autores sugirieron que el tracto gastrointestinal de estos peces actúa como una barrera que responde a los contaminantes ingeridos, con el fin de reducir su absorción y translocación; permitiendo su uso como bioindicadores de contaminación ambiental del agua (Pustiglione Marinsek *et al.*, 2018).

Dentro de los organismos que forman parte de la comunidad bentónica, los microinvertebrados permiten la evaluación de los efectos adversos a largo plazo gracias a su naturaleza sedentaria, su gran distribución, su abundancia, su fácil manipulación por su tamaño, su sensibilidad a sustancias contaminantes que se encuentran en los cuerpos acuáticos y sus hábitos alimenticios con sedimentos donde logran acumularse los contaminantes (Zúñiga *et al.*, 1993). En Colombia, Nazarova *et al.*, (2004) realizaron observaciones sobre deformidades del aparato bucal en larvas de *Chironomidae* en canales laterales de la Ciénaga Grande de Santa Marta, donde la comunidad es dominada por especies de *Goeldichironomus* y *Chironomus*. La tasa promedio de deformidades bucales sobre todas las larvas de *Chironomidae* encontradas fue del 21%, mientras que, bajo condiciones naturales, las tasas de deformidades generalmente no exceden del 8%. Estos autores determinaron que la presencia de metales pesados en los sedimentos provenientes de los canales del río Magdalena, la estructura física de los sedimentos depositados y un agotamiento nocturno del oxígeno disponible a causa de la contaminación orgánica de la zona de estudio, posiblemente contribuyan a una parte importante de los procesos esenciales a pequeña escala espacial (Nazarova *et al.*, 2004)

En ese mismo orden de ideas, Gamboa *et al.*, (2008) determinaron que los órdenes de insectos tales como: *Ephemeroptera*, *Trichoptera*, *Plecoptera*, *Diptera*, *Odonata* y *Coleoptera* son buenos biomarcadores para determinar la calidad del agua, ya que son capaces de estimar la tolerancia de los bentos a contaminantes (BMW, IBMW, BMWQ, IBF, EPT, el porcentaje de raspadores y la abundancia de *Chironomidae*) y dan respuesta a estos mismos contaminantes. En ese sentido, Sierpe & Sunico, (2019) caracterizaron la fauna de insectos quironómidos (*Díptera*, *Chironomidae*) mediante determinación taxonómica a nivel de género, con el objetivo de ajustar y mejorar la eficiencia de los índices bióticos de calidad ambiental, diseñados y adaptados para el diagnóstico y monitoreo en ambientes acuáticos de la región de la cuenca del Río Gallegos en Santa Cruz, Argentina. Sus resultados mostraron que la mayor diversidad de los órdenes plecópteros, efemerópteros y tricópteros, considerados como bioindicadores de buena calidad de aguas, se encontraron en los sitios más alejados de toda actividad antrópicas, mientras que en los sitios perturbados por la actividad minera en el sitio de acción registraron la menor diversidad de estas especies (Sierpe & Sunico, 2019).

Por otra parte, en los sistemas fluviales y aguas de mar en sitios de recreación, donde los bañistas actúan como reservorios de vectores y fuentes de infección, los biólogos estudian otras bacterias que pueden ser indicadoras de salud ambiental, estas son los coliformes totales y fecales considerados como indicadores de contaminación fecal. Pertenecen a la familia *Enterobacteriaceae* siendo los más representativos: *Escherichia coli*, *Citrobacter* sp., *Enterobacter* sp. y *Klebsiella* sp. (Santiago-Rodríguez *et al.*, 2012).

Cambios en la biodiversidad

Tradicionalmente, los bioindicadores ayudan a detectar alteraciones en los ecosistemas tales como explotación excesiva, contaminación o cambio climático, con la respectiva influencia en la diversidad de especies animales. Aunado

a las actividades antropogénicas, tales como la deforestación, la construcción de presas y carreteras, el cambio de uso del suelo, entre otros, han producido alteraciones en la biodiversidad de los ecosistemas, lo que modifica de manera significativa el número y movimiento de la fauna no nociva, pero también de los reservorios y de los vectores, impactando directamente en la incidencia de las enfermedades en humanos (Laniak *et al.*, 2013).

En consonancia a lo anterior, Romero Velóz *et al.*, (2021) hallaron patrones de ajuste de la biología de mosquitos vectores del género *Aedes* a consecuencia del cambio climático global, hacia nuevos espacios geográficos cuyas condiciones geoambientales como la altitud, el clima, entre otros, le servían de barrera natural. Los investigadores determinaron que la concentración y adaptabilidad vectorial fue proporcional al perfil altitudinal en los países de la región andina entre 2018 y 2020. Estos hallazgos concuerdan con reportes previos de cambios en la distribución de *Ae. aegypti* y *Ae. albopictus* hechos por Radke *et al.*, (2012) Fischer *et al.*, (2013) y Van Bortel *et al.*, (2014). Para el 2022, la bióloga maestra Sánchez Tinjacá considera que ambos vectores son especies invasoras, asociado a factores antropogénicos y climáticos, y a futuro se espera un aumento en la distribución de especies de *Aedes* y en la prevalencia de enfermedades de transmisión aérea, como el dengue, chikungunya o el zika, lo que representa un riesgo en términos de salud pública ya que determinados arbovirus podrían transmitirse del ciclo silvestre al urbano.

Sin embargo, esta causalidad es similar para otras enfermedades de transmisión vectorial, con sus respectivas particularidades. El biólogo Nieto Cardosa, (2020) indica que la temperatura, las precipitaciones y la humedad son los principales factores derivados del cambio climático que provocan ya actualmente, un cambio en las áreas de idoneidad de las enfermedades de transmisión vectorial s hacia zonas de mayor altitud y latitud. De acuerdo a este investigador, la incidencia, prevalencia y mortalidad aumentará en las nuevas áreas, por lo que una adecuada respuesta de salud pública será necesaria (Canals, 2019; Nieto Cardosa, 2020) .

Consideraciones finales

Ante los retos que representa la triple emergencia medioambiental, es donde el equipo científico debe abordar el estudio de los múltiples factores relacionados, especialmente los biólogos que conocen y pueden establecer todo vínculo asociado con las ciencias de la vida. Los últimos años han sido testigos del surgimiento de nuevos campos sistémicos, como la investigación en bioindicadores, la biología sintética e ingeniería metabólica, que permiten revisar los mismos desafíos de contaminación ambiental a través de enfoques nuevos y mucho más poderosos. El enfoque en sitios y productos químicos contaminados se ha ampliado por los problemas fenomenales de las emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero y la acumulación de desechos plásticos a escala global. Ahora, ya no es posible hablar de una única ciencia capaz de resolver los problemas de contaminación ambiental, ya es hora de comenzar a hablar de Ingeniería Biológica capaz de llevar la solución a una escala mayor (Dvořák *et al.*, 2017).

Agradecimientos

A los biólogos, nuestros colegas, por su incansable labor investigativa y educadora.

Referencias

- Agan, Y., Probst, A., & Séjalon-Delmas, N. (2017). Evaluation of lichen species resistance to atmospheric metal pollution by coupling diversity and bioaccumulation approaches: A new bioindication scale for French forested areas. *Ecological Indicators*, 72, 99-110. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.08.006>
- Alcalá, J., Sosa, M., Moreno, M., Quintana, C., Quintana, G., Miranda, S., & Rubio, A. (2008). Metales pesados en vegetación arbórea como indicador de la calidad ambiental urbana: ciudad de Chihuahua, México. *Multequina*, 17(1), 39-54. Disponible en: http://www.scielo.org.ar/scielo.php?pid=S1852-73292008000100002&script=sci_arttext&tlng=en (Acceso febrero 2022).
- Baretta, D., Mafra, Á. L., Santos, J. C. P., Amarante, C., & Bertol, I. (2006). Análise multivariada da fauna edáfica em diferentes sistemas de preparo e cultivo do solo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 41, 1675-1679. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2006001100014>
- Benítez, A., Aragón, G., González, Y., & Prieto, M. (2018). Functional traits of epiphytic lichens in response to forest disturbance and as predictors of total richness and diversity. *Ecological Indicators*, 86, 18-26. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.12.021>
- Blanco Obregón, J. M. (2018). El ceibo (*Ceiba* sp.) como indicador de fuentes de contaminación atmosférica, en el distrito de Chacabayo, Lima, Perú. Disponible en: <http://cybertesis.unmsm.edu.pe/handle/20.500.12672/9717> (Acceso febrero 2022).
- Boopeng, C., Sriviboon, C., Polyiam, W., Sangiamdee, D., Watthana, S. & Boonpragob, K (2018) Assessing atmospheric pollution in a petrochemical industrial district using a lichen-air quality index (LiAQI). *Ecological indicators*, 95, 589-594. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.08.012>

- Boopeng, C., Sriviboon, C., Polyiam, W., Sangiamdee, D., Watthana, S., & Boonpragob, K. (2018). Assessing atmospheric pollution in a petrochemical industrial district using a lichen-air quality index (LiAQI). *Ecological indicators*, 95, 589-594. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.08.012>
- Canals, M. (2019). Cambio climático, biodiversidad y enfermedades emergentes. El cambio climático y la biología funcional de los organismos. Disponible en: <https://books.google.es/books?id=9vHvDwAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=es> (Acceso febrero 2022).
- Cohen, A. J., Ross Anderson, H., Ostro, B., Pandey, K. D., Krzyzanowski, M., Künzli, N., Gutschmidt, K., Pope, A., Romieu, I., Samet, J. M., & Smith, K. (2005). The global burden of disease due to outdoor air pollution. *Journal of toxicology and environmental health. Part A*, 68(13-14), 1301-1307. <https://doi.org/10.1080/15287390590936166>
- Correa-Ochoa, M. A., Vélez-Monsalve, L. C., Saldarriaga-Molina, J. C., & Jaramillo-Ciro, M. M. (2020). Evaluation of the Index of Atmospheric Purity in an American tropical valley through the sampling of corticolous lichens in different phorophyte species. *Ecological Indicators*, 115, 106355. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106355>
- Domínguez, E., Giorgi, A., & Gómez, N. (2020). La bioindicación en el monitoreo y evaluación de los sietmas fluviales de la Argentina. Universidad de Buenos Aires. Disponible en: <https://www.ilpla.edu.ar/prueba/wp-content/uploads/2021/07/Libro-Completo-Rem-Aqua.pdf> (Acceso febrero 2022).
- Dresler, S., Kováčik, J., Wójciak, H., Sowa, I., Strzemiński, M., & Wójciak, M. (2021). Allantoin content in lichens depends on anthropopressure level. *Ecological Indicators*, 124, 107312. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.107312>
- Etewa, S. E., Abdel-Rahman, S. A., Abd El-Aal, N. F., Fathy, G. M., El-Shafey, M. A., & Ewis, A. M. (2016). Geohelminths distribution as affected by soil properties, physicochemical factors and climate in Sharkyia governorate Egypt. *Journal of parasitic diseases: official organ of the Indian Society for Parasitology*, 40(2), 496-504. <https://doi.org/10.1007/s12639-014-0532-5>
- Ezzati, M., Lopez, A., Rodgers, A., Vander, S. & Murray, C. (2002). Selected major risk factors and global and regional burden of disease. *Lancet* 2002, 360, 1347-1360. [https://doi.org/10.1016/s0140-6736\(02\)11403-6](https://doi.org/10.1016/s0140-6736(02)11403-6)
- Fischer, D., Thomas, S. M., Suk, J. E., Sudre, B., Hess, A., Tjaden, N. B., & Semenza, J. C. (2013). Efectos del cambio climático en la transmisión de Chikungunya en Europa: análisis geoespacial de la idoneidad climática del vector y los requisitos de temperatura del virus. *International Journal of Health Geographics*, 12 (1), 51. <https://doi.org/10.1186/1476-072X-12-51>
- Gamboa, M., Reyes, R., & Arrivillaga, J. (2008). Macroinvertebrados bentónicos como bioindicadores de salud ambiental. *Boletín de malariología y salud ambiental*, 48(2), 109-120. Disponible en: http://ve.scielo.org/scielo.php?pid=S1690-46482008000200001&script=sci_arttext (Acceso febrero 2022).
- Huang, Y. P., Xiang, J. T., Wang, C. H., Ren, D., & Xu, T. (2019). Lichen as a biomonitor for vehicular emission of metals: a risk assessment of lichen consumption by the Sichuan snub-nosed monkey (*Rhinopithecus roxellana*). *Ecotoxicology and environmental safety*, 180, 679-685. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.05.047>
- Klapstein, S. J., Walker, A. K., Saunders, C. H., Cameron, R. P., Murimboh, J. D., & O'Driscoll, N. J. (2020). Spatial distribution of mercury and other potentially toxic elements using epiphytic lichens in Nova Scotia. *Chemosphere*, 241, 125064. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.125064>
- Kłos, A., Ziembik, Z., Rajfur, M., Dołhańczuk-Śródka, A., Bochenek, Z., Bjerke, J. W., & Świsłowski, P. (2018). Using moss and lichens in biomonitoring of heavy-metal contamination of forest areas in southern and north-eastern Poland. *Science of the Total Environment*, 627, 438-449. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.211>
- Korc, M. & Hauchman, F. (2021). Advancing environmental public health in Latin America and the Caribbean. *Revista Panamericana de Salud Pública*, 45, e118. <https://doi.org/10.26633/RPSP.2021.118>
- Krewski, D., Jerrett, M., Burnett, R., Ma, R., Hughes, E., Shi, Y., Turner, M., Pope, C., Thurston, G., Calle, E., & Tempalski, B. (2009). Extended Follow-Up and Spatial Analysis of the American Cancer Society Study Linking Particulate Air Pollution and Mortality. *Research Reports: Health Effects Institute*, 140, 5-114. Disponible en: [https://www.scrip.org/\(S\(lz5mqp453edsnp55rrgict55.\)\)/reference/referencespapers.aspx?referenceid=1205209](https://www.scrip.org/(S(lz5mqp453edsnp55rrgict55.))/reference/referencespapers.aspx?referenceid=1205209) . (Acceso febrero 2022).
- Laden, F., Schwartz, J., Speizer, F. & Dockery, D. (2006). Reduction in Fine Particulate Air Pollution and Mortality: Extended Follow-up of the Harvard Six Cities Study. *Am. J. Respir. Crit. Care Med.* 2006, 173, 667-672. <https://doi.org/10.1164/rccm.200503-443oc>
- Laniak, G. F, Olchin, G., Goodall, J., Voinov, A., Hill, M., Glynn, P., & Hughes, A. (2013). Modelado ambiental integrado: una visión y hoja de ruta para el futuro. *Modelado Ambiental & Software*, 39, 3-23.

- León, J., Oré, L., Vertíz, J., Méndez, I., Ilizarbe, G., Marcado, C., García, G. & Díaz, J. (2022). Geohelminthos y parámetros físico-químicos del suelo como indicadores de calidad ambiental en el distrito de José Crespo y Castillo, Huánuco. *Boletín de Malariología y Salud Ambiental*, 62(3) 383-396. <https://doi.org/10.52808/bmsa.7e6.623.004>
- Libohova, Z., Seybold, C., Wysocki, D., Wills, S., Schoeneberger, P., Williams, C., Lindbo, D., Stott, D. & Owens, P. (2018). Reevaluating the effects of soil organic matter and other properties on available water-holding capacity using the National Cooperative Soil Survey characterization database. *Journal of Soil and Water Conservation*. 73 (4), 411–421. <https://doi.org/10.2489/jswc.73.4.411>
- Lim, S., Vos, T., Flaxman, A., Danaei, G., Shibuya, K., Adair, H., Amann, M., Anderson, H., Andrews, K., Aryee, M., et al. (2010). A comparative risk assessment of burden of disease and injury attributable to 67 risk factors and risk factor clusters in 21 regions, 1990–2010: A systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2010. *Lancet*. 380, 2224–2260. [https://doi.org/10.1016/s0140-6736\(12\)61766-8](https://doi.org/10.1016/s0140-6736(12)61766-8)
- Lotrecchiano, N., Montano, L., Bonapace, I., Giancarlo, T., Trucillo, P.m & Sofia, D. (2022). Comparison Process of Blood Heavy Metals Absorption Linked to Measured Air Quality Data in Areas with High and Low Environmental Impact. *Processes* 10, 1409. <https://doi.org/10.3390/pr10071409>
- Lucheta, F., Koch, N. M., Käffer, M. I., Riegel, R. P., de Azevedo Martins, S. M., & Schmitt, J. L. (2019). Lichens as indicators of environmental quality in southern Brazil: An integrative approach based on community composition and functional parameters. *Ecological Indicators*, 107, 105587. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105587>
- Malaspina, P., Modenesi, P., & Giordani, P. (2018). Physiological response of two varieties of the lichen *Pseudevernia furfuracea* to atmospheric pollution. *Ecological Indicators*, 86, 27-34. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.12.028>
- Manjarrez, G., Blanco, J., González, B., Botero, C. M., & Díaz-Mendoza, C. (2019). Parásitos en playas turísticas: propuesta de inclusión como indicadores de calidad sanitaria. *Revisión para América Latina. Ecología Aplicada*, 18(1), 91-100. <http://dx.doi.org/10.21704/rea.v18i1.1311>
- Manninen, S. (2018). Deriving nitrogen critical levels and loads based on the responses of acidophytic lichen communities on boreal urban *Pinus sylvestris* trunks. *Science of the Total Environment*, 613, 751-762. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.150>
- Marié, D. C., Chaparro, M. A., Lavornia, J. M., Sinito, A. M., Miranda, A. G. C., Gargiulo, J. D., & Böhnel, H. N. (2018). Atmospheric pollution assessed by in situ measurement of magnetic susceptibility on lichens. *Ecological Indicators*, 95, 831-840. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.08.029>
- Massimi, L., Castellani, F., Protano, C., Conti, M. E., Antonucci, A., Frezzini, M. A., & Canepari, S. (2021). Lichen transplants for high spatial resolution biomonitoring of Persistent Organic Pollutants (POPs) in a multi-source polluted area of Central Italy. *Ecological Indicators*, 120, 106921. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106921>
- Massimi, L., Conti, M. E., Mele, G., Ristorini, M., Astolfi, M. L., & Canepari, S. (2019). Lichen transplants as indicators of atmospheric element concentrations: a high spatial resolution comparison with PM10 samples in a polluted area (Central Italy). *Ecological indicators*, 101, 759-769. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.12.051>
- Nazarova, L. B., Riss, H. W., Kahlheber, A., & Werding, B. (2004). Some observations of buccal deformities in *Chironomid larvae* (diptera: chironomidae) from the Ciénaga Grande de Santa Marta, Colombia. *Caldasia*, 275-290. Disponible en: <https://www.jstor.org/stable/23641799> (Acceso febrero 2022).
- Nieto Cardosa, S. (2020). Influencia del cambio climático en las enfermedades transmitidas por vectores. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10234/190554> (Acceso febrero 2022).
- Olorunfemi, I., Fasinmirin, J., & Ojo, A. (2016). Modeling cation exchange capacity and soil water holding capacity from basic soil properties. *Eurasian Journal of Soil Science*, 5(4), 266–274. <http://dx.doi.org/10.18393/ejss.2016>
- OMS. (2021). Global air quality guidelines: particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. Disponible en: <https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/345329/9789240034228-eng.pdf?sequence=1&isAllowed=y> (Acceso diciembre 2021).
- OMS. (2022). Nueve de cada diez personas de todo el mundo respiran aire contaminado. Disponible en: <https://www.who.int/es/news/item/02-05-2018-9-out-of-10-people-worldwide-breathe-polluted-air-but-more-countries-are-taking-action> (Acceso marzo 2022).
- ONU. (2021). Making Peace With Nature. Disponible en: <https://www.unep.org/resources/making-peace-nature> (Acceso marzo 2022).
- ONU. (2022) Consejo de Derechos Humanos. Informe del Relator Especial sobre la cuestión de las obligaciones de derechos humanos relacionadas con el disfrute de un medio ambiente sin riesgos, limpio, saludable y sostenible.

- Disponibile en: <https://documents-ddsny.un.org/doc/UNDOC/GEN/G22/004/51/PDF/G2200451.pdf?OpenElement> (Acceso marzo 2022).
- OPS. (2020). Determinantes Ambientales de Salud. Disponible en: <https://www.paho.org/es/temas/determinantes-ambientales-salud#:~:text=La%20salud%20p%C3%BAblica%20ambiental%2C%20que%20los%20comportamientos%20relacionados%20con%20estos> (Acceso marzo 2022).
- Ortiz, B. I., Sanz, J. G., Dorado, M. V & Villar, S. F. (2007). Técnicas de recuperación de suelos contaminados. Informe de Vigilancia Tecnológica. Universidad de Alcalá. Dirección General de Universidades e Investigación. España. Disponible en: https://www.madrimasd.org/sites/default/files/informacionidi/biblioteca/publicacion/doc/VT/vt6_tecnicas_recuperacion_suelos_contaminados.pdf (Acceso diciembre 2021).
- Paoli, L., Vannini, A., Fačková, Z., Guarnieri, M., Bačkor, M., & Loppi, S. (2018). One year of transplant: is it enough for lichens to reflect the new atmospheric conditions?. *Ecological Indicators*, 88, 495-502. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.01.043>
- Parviainen, A., Casares-Porcel, M., Marchesi, C., & Garrido, C. J. (2019). Lichens as a spatial record of metal air pollution in the industrialized city of Huelva (SW Spain). *Environmental Pollution*, 253, 918-929. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.07.086>
- Pinho, P., Barros, C., Augusto, S., Pereira, M. J., Máguas, C., & Branquinho, C. (2017). Using nitrogen concentration and isotopic composition in lichens to spatially assess the relative contribution of atmospheric nitrogen sources in complex landscapes. *Environmental Pollution*, 230, 632-638. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.06.102>
- Pope, C., Ezzati, M. & Dockery, D. (2009). Fine-Particulate Air Pollution and Life Expectancy in the United States. *N. Engl. J. Med.* 2009, 360, 376-386. <https://doi.org/10.1080/10473289.2006.10464485>
- Pustiglione Marinsek, G., Moledo de Souza Abessa, D., Gusso-Choueri, P. K., Brasil Choueri, R., Nascimento Gonçalves, A. R., D'angelo Barroso, B. V., Souza Santos, G., Margarete Cestari, M., Galvão de Campos, B., & de Britto Mari, R. (2018). Enteric nervous system analyses: New biomarkers for environmental quality assessment. *Marine pollution bulletin*, 137, 711-722. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.11.015>
- Pustiglione Marinsek, G., Moledo de Souza Abessa, D., Gusso-Choueri, P. K., Brasil Choueri, R., Nascimento Gonçalves, A. R., D'angelo Barroso, B. V., Souza Santos, G., Margarete Cestari, M., Galvão de Campos, B., & de Britto Mari, R. (2018). Enteric nervous system analyses: New biomarkers for environmental quality assessment. *Marine pollution bulletin*, 137, 711-722. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.11.015>
- Radke, E. G., Gregory, C. J., Kintziger, K. W., Sauber-Schatz, E. K., Hunsperger, E. A., Gallagher, G. R., & Blackmore, C. G. (2012). Brote de dengue en Key West, Florida, EE. UU., 2009. *Enfermedades infecciosas emergentes*, 18 (1), 135-137
- Rola, K. (2019). Heavy-metal tolerance of photobiont in pioneer lichens inhabiting heavily polluted sites. *Science of the Total Environment*, 679, 260-269. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05.002>
- Sánchez Tinjacá, Y. V. (2022). Distribución histórica, actual y potencial bajo escenarios de Cambio Climático de los mosquitos *Aedes aegypti* y *Aedes albopictus* en Colombia. Disponible en: <http://hdl.handle.net/1992/59461> (Acceso febrero 2022).
- Santiago-Rodríguez, T., Tremblay, R., Toledo, C., Gonzalez, J., Ryu, H., Santo Domingo J. & Toranzos, G. (2012). Microbial quality of tropical inland waters and effects of rainfall events. *Environmental Microbiology*, 78(15), 5160-5169. <https://doi.org/10.1128/aem.07773-11>
- Serrano, H. C., Oliveira, M. A., Barros, C., Augusto, A. S., Pereira, M. J., Pinho, P., & Branquinho, C. (2019). Measuring and mapping the effectiveness of the European Air Quality Directive in reducing N and S deposition at the ecosystem level. *Science of the total environment*, 647, 1531-1538. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.059>
- Sierpe, C., & Sunico, A. (2019). Familia Chironomidae (Orden Díptera) utilizada como bioindicador para la determinación de calidad ambiental de la cuenca del Río Gallegos (Santa Cruz, Argentina). *Informes Científicos Técnicos-UNPA*, 11(2), 92-105.
- Socarrás, A. (2013). Mesofauna edáfica: indicador biológico de la calidad del suelo. *Pastos y Forrajes*, 36(1), 5-13. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=269127587001> (Acceso febrero 2022).
- Sujetovienė, G., Smilgaitis, P., Dagiliūtė, R., & Žaltauskaitė, J. (2019). Metal accumulation and physiological response of the lichens transplanted near a landfill in central Lithuania. *Waste Management*, 85, 60-65. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.12.017>

- Timoteo Cornejo, G. C. H. (2022). Revisión sistemática. Líquenes epifitos como bioindicadores eficientes y adaptables de la calidad del aire. Disponible en: <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/88516> (Acceso marzo 2022).
- Torres Ordoñez, L. H., Arguello Pazmiño, A. M., Reyes Soriano, F. E., & Ortiz Novillo, C. R. (2021). Contaminación del aire y su influencia en la incidencia de enfermedades respiratorias en Santa Elena Ecuador 2020. *Boletín de Malariología y Salud Ambiental*, 61(2), 328-336. <https://doi.org/10.52808/bmsa.7e5.612.023>
- Van Bortel, W., Dorleans, F., Rosine, J., Blateau, A., Rousset, D., Matheus, S., & Zeller, H. (2014). Brote de chikungunya en la región del Caribe, diciembre de 2013 a marzo de 2014, y la importancia para Europa. *Euro Surveillance: Bulletin Europeen sur les maladies transmissibles-Boletín europeo de enfermedades transmisibles*, 19(13), 20759.
- Vannini, A., Tedesco, R., Loppi, S., Di Cecco, V., Di Martino, L., Nascimbene, J., & Barbante, C. (2021). Lichens as monitors of the atmospheric deposition of potentially toxic elements in high elevation Mediterranean ecosystems. *Science of the Total Environment*, 798, 149369. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149369>
- Varela, Z., López-Sánchez, G., Yáñez, M., Pérez, C., Fernández, J. A., Matos, P., & Aboal, J. R. (2018). Changes in epiphytic lichen diversity are associated with air particulate matter levels: The case study of urban areas in Chile. *Ecological Indicators*, 91, 307-314. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.04.023>
- Xu, N., Amgain, N. R., Rabbany, A., Capasso, J., Korus, K., Swanson, S., & Bhadha, J. H. (2022). Interaction of soil health indicators to different regenerative farming practices on mineral soils. *Agrosystems, Geosciences & Environment*, 5:e20243. <https://doi.org/10.1002/agg2.2024>
- Zabati, J. (2022). Conflictos ambientales, salud y desarrollo. Límites y confianza. *Rev. salud ambient.* 22(Espec. Congr.),74-143. Disponible en: [https://rsa.22.esp.2022.117-118%20\(2\).pdf](https://rsa.22.esp.2022.117-118%20(2).pdf) (Acceso agosto 2021).
- Zhao, L., Zhang, C., Jia, S., Liu, Q., Chen, Q., Li, X., & Liu, H. (2019). Element bioaccumulation in lichens transplanted along two roads: The source and integration time of elements. *Ecological Indicators*, 99, 101-107. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.12.020>
- Zúñiga, M., Rojas, A. & Caicedo, G. (1993). Indicadores ambientales de calidad de agua en la Cuenca del río Cauca. *Asociación de Ingenieros Sanitarios de Antioquia Medellín, Colombia*. 2: 17-28. Disponible en: https://documen.site/download/zuiga-m-2009-capitulo-7-bioindicadores-de-calidad-de-agua-y_pdf (Acceso agosto 2021).