

¿Quién está ahí?: el ADN ambiental aporta nuevas claves para comprender la biodiversidad

Por: Peter Andrey Smith. 13/04/2024

La capacidad de extraer trazas de ADN del suelo, el agua e incluso el aire está revolucionando la ciencia. Pero no es infalible.

A finales de los años ochenta, en un centro de investigación federal de Pensacola (Florida), la investigadora Tamar Barkay utilizó el lodo de una forma que resultó revolucionaria y que en aquel momento ella no podría haber imaginado. En una versión rudimentaria de **una técnica que ahora está revolucionando muchos campos científicos**, Barkay había recogido varias muestras de lodo: una de un embalse interior, otra de un pantano salobre y una tercera de una ciénaga de agua salada. Puso estas muestras de sedimentos en botellas de cristal en el laboratorio y luego añadió mercurio, creando lo que equivalía a un lodo tóxico.

En aquella época, Barkay trabajaba para la Agencia de Protección del Medio Ambiente y quería saber cómo interactuaban los microorganismos del lodo con el mercurio, un contaminante industrial, para lo cual era necesario conocer todos los organismos de un entorno determinado, no sólo la pequeña parte que podía cultivarse con éxito en placas de Petri. Pero la cuestión subyacente era tan básica que sigue siendo uno de los interrogantes fundamentales de la biología. Como explica Barkay, ya jubilada, en una entrevista reciente desde Boulder, Colorado: “**¿Quién está ahí?**”. Y, lo que es igual de importante, añadió: “¿Qué hacen ahí?”.

Este tipo de preguntas siguen siendo pertinentes hoy en día, y las formulan ecologistas, funcionarios de salud pública, biólogos de la conservación, médicos forenses y quienes estudian la evolución y los entornos antiguos, y llevan a epidemiólogos y biólogos a rincones remotos del mundo.

El artículo que Barkay y sus colegas publicaron en 1987 en el [Journal of Microbiological Methods](#) esbozaba un método -la “extracción directa de ADN ambiental”- que permitiría a los investigadores realizar un censo. Era una herramienta práctica, aunque bastante sucia, para detectar quién estaba ahí. Barkay la utilizó durante el resto de su carrera.

Hoy en día, el estudio se cita como uno de las primeras aproximaciones al ADN ambiental (o ADNa), **una forma relativamente barata, generalizada y potencialmente automatizada de observar la diversidad y distribución de la vida**. A diferencia de las técnicas anteriores, que podían identificar el ADN de, por ejemplo, un solo organismo, el método también recoge todo el torbellino de material genético que lo rodea. En los últimos años, el campo ha crecido considerablemente. “Tiene su propia revista (...), su propia sociedad científica. Se ha convertido en un campo establecido”, explica Eske Willerslev, genetista evolutivo de la Universidad de Copenhague.

“Todos somos escamosos. Hay trozos de restos celulares desprendiéndose de nosotros todo el tiempo”.

El ADNa sirve como **herramienta de vigilancia**, ofreciendo a los investigadores un medio de detectar lo aparentemente indetectable. Mediante el muestreo de ADNa, o mezclas de material genético -es decir, fragmentos de ADN, el modelo de la vida- en el agua, el suelo, núcleos de hielo, bastoncillos de algodón o prácticamente cualquier entorno imaginable, incluso el aire, ahora es posible buscar un organismo concreto o reunir una instantánea de todos los organismos de un lugar determinado. En lugar de instalar una cámara para ver quién cruza la playa por la noche, el ADNa extrae esa información de las huellas en la arena. “Todos somos escamosos, ¿verdad? Hay trozos de restos celulares que se desprenden todo el tiempo”, afirma Robert Hanner, biólogo de la Universidad de Guelph (Canadá).

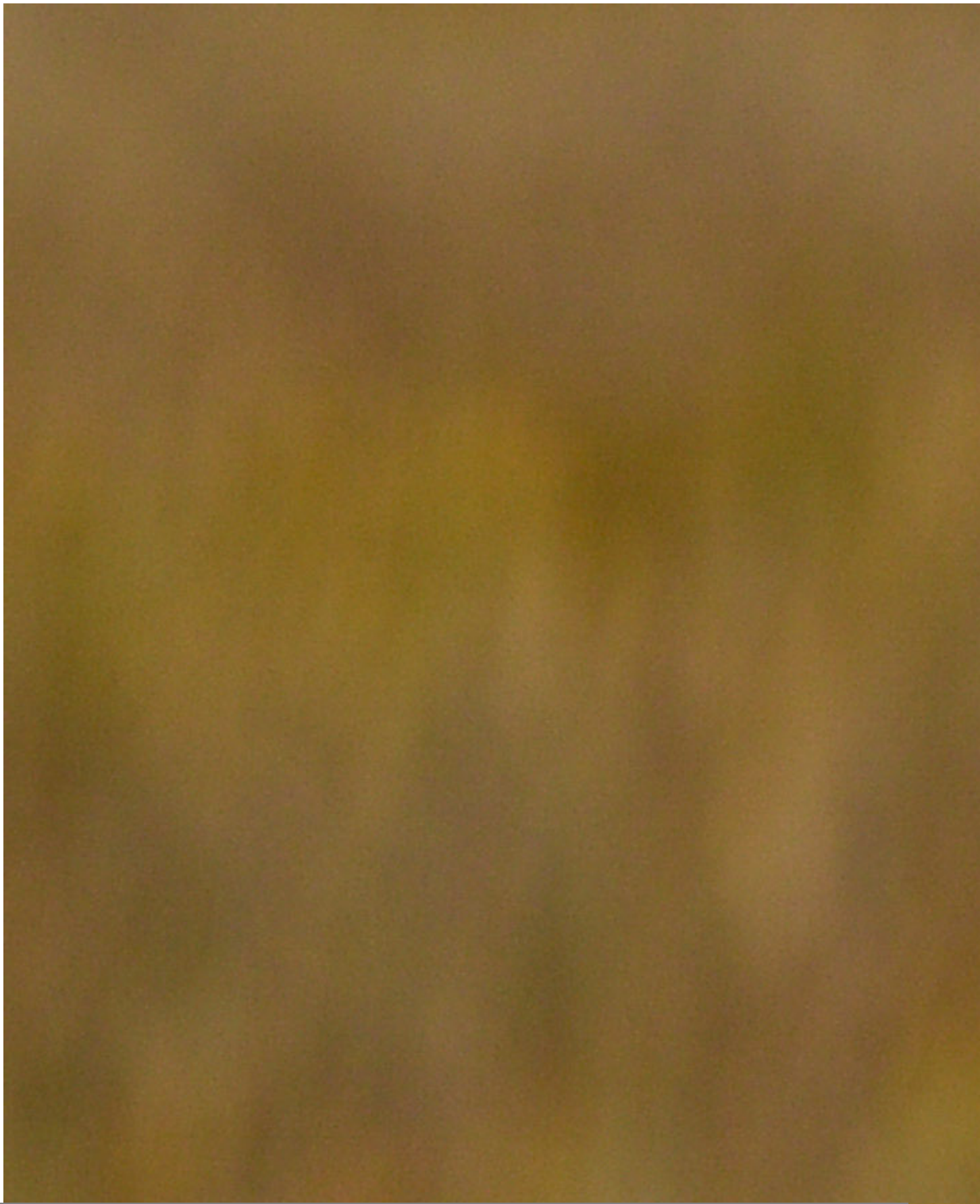
Como método para confirmar la presencia de algo, el ADN no es infalible. Por ejemplo, el organismo detectado en el ADN puede no vivir realmente en el lugar donde se recogió la muestra; Hanner puso el ejemplo de un ave que pasaba por allí, una garza, que se comió una salamandra y luego expulsó parte de su ADN, lo que podría ser una de las razones por las que hay señales del anfibio en algunas zonas donde nunca se han encontrado físicamente.

Con todo, el ADN puede ayudar a descubrir rastros genéticos, algunos de los cuales se desprenden en el medio ambiente, ofreciendo una forma emocionante -y potencialmente escalofriante- de recopilar información sobre los organismos, incluidos los humanos, en sus actividades cotidianas.

La base conceptual del ADN se remonta a un siglo, mucho antes de la llegada de la llamada biología molecular, y a menudo se atribuye a Edmond Locard, un criminólogo francés que trabajaba a principios del siglo XX. En una serie de artículos publicados en 1929, Locard propuso un principio: todo contacto deja un rastro. En esencia, el ADN traslada el principio de Locard al siglo XXI.

Durante las primeras décadas, el campo en el que se convirtió el ADN -incluido el trabajo de Barkay en los años 80- se centró principalmente en la vida microbiana. Si echamos la vista atrás, parece que el ADN tardó en salir del fango proverbial.

No fue hasta 2003 cuando el método descubrió **un ecosistema desaparecido**. Dirigido por Willerslev, el estudio de 2003 extrajo ADN antiguo de menos de una cucharadita de sedimento, demostrando por primera vez la viabilidad de detectar organismos más grandes con la técnica, incluidas plantas y mamuts lanudos. En el mismo estudio, los sedimentos recogidos en una cueva de Nueva Zelanda (que, como era de esperar, no habían sido congelados) revelaron un ave extinguida: el moa. Lo más sorprendente es que estas aplicaciones para estudiar el ADN antiguo proceden de una prodigiosa cantidad de estiércol arrojado al suelo hace cientos de miles de años.



A veces, la investigación del ADN es complicada porque podría mostrar ADN en un lugar donde no vive un animal, como los restos digeridos de una salamandra que ha sido excretada por un ave lejos de donde vivía originalmente. TERESA KOPEC/GETTY IMAGES

A Willerslev se le había ocurrido la idea unos años antes, mientras contemplaba un montón de estiércol más reciente: Entre su máster y su doctorado en Copenhague, se encontraba en un callejón sin salida, luchando por conseguir huesos, restos óseos u otros especímenes físicos para estudiar. Pero un otoño, miró por la ventana a “un perro defecando en la calle”, recuerda. La escena le hizo pensar en el ADN de las heces y en cómo la lluvia lo arrastra sin dejar rastro visible. Pero Willerslev se preguntó: “¿Podría ser que el ADN sobreviviera? Eso es lo que me propuse averiguar”.

El ADN puede ayudar a descubrir rastros genéticos, ofreciendo una forma emocionante -y potencialmente escalofriante- de recopilar información sobre organismos en su actividad cotidiana.

El artículo demostró la **notable persistencia del ADN**, que, según él, sobrevive en el medio ambiente mucho más tiempo de lo que sugerían estimaciones anteriores. Desde entonces, Willerslev ha analizado ADN en la tundra helada de la actual Groenlandia, que data de hace 2 millones de años, y está trabajando con muestras de Angkor Wat, el enorme complejo de templos de Camboya que se cree que se construyó en el siglo XII “Es la peor conservación de ADN que puedas imaginar. Es decir, hace calor y hay humedad. Pero podemos sacar ADN”.

Willerslev no es el único que ve una herramienta potencial con aplicaciones aparentemente ilimitadas, sobre todo ahora que los avances permiten a los investigadores secuenciar y analizar mayores cantidades de información genética. “Es una ventana abierta para muchas, muchas cosas”, dijo, “y muchas más de las que se me ocurren, estoy seguro”. No se trata sólo de los antiguos mamuts; el ADN podría revelar organismos actuales que se esconden entre nosotros.

Los científicos utilizan el ADN para rastrear criaturas de todas las formas y tamaños, ya se trate de una sola especie, como minúsculos trozos de algas invasoras, anguilas en el lago Ness o un topo vidente que vive en la arena y no ha sido visto en casi 90 años; los investigadores toman muestras de comunidades

enteras, por ejemplo, observando el ADN que se encuentra en las flores silvestres o el ADN que sopla en el viento como sustituto de todos los pájaros y abejas visitantes y otros animales polinizadores.

El siguiente salto evolutivo en la historia del ADN se produjo en torno a la búsqueda de organismos que viven actualmente en los medios acuáticos de la Tierra. En 2008, apareció un titular: “El agua conserva la memoria del ADN de especies ocultas”. No procedía de un tabloide sensacionalista, sino de la respetada publicación especializada Chemistry World, y describía el trabajo del investigador francés Pierre Taberlet y sus colegas. El grupo buscaba ranas toro marrones y verdes, que pueden pesar más de un kilo y medio y que se consideran una especie invasora en Europa occidental, ya que arrasan con todo a su paso. Para encontrarlas, los herpetólogos tenían que explorar la costa con prismáticos y volver al atardecer para escuchar sus cantos. El artículo de 2008 sugería una forma más fácil de hacerlo: un estudio que requería mucho menos personal.

“Se podía obtener ADN de esa especie **directamente del agua**. Eso realmente supuso el pistoletazo de salida para el campo del ADN ambiental”, afirma Philip Thomsen, biólogo de la Universidad de Aarhus (que no participó en el estudio).

Las ranas pueden ser difíciles de detectar y, por supuesto, no son la única especie que elude la detección tradicional sobre el terreno. Thomsen empezó a trabajar con otro organismo que confunde notoriamente las mediciones: los peces. A veces se dice que el recuento de peces es muy parecido al de árboles, con la diferencia de que los peces vagan libremente por lugares oscuros y los recuentos se hacen con los ojos vendados. El ADN medioambiental se deshizo de la venda. Una revisión de la bibliografía publicada sobre la tecnología -aunque con advertencias, como detecciones imperfectas e imprecisas o detalles sobre la abundancia- descubrió que los estudios de ADN sobre peces y anfibios marinos y de agua dulce superaban en número a sus homólogos terrestres en una proporción de 7 a 1.

En 2011, Thomsen, entonces doctorando en el laboratorio de Willerslev, publicó un artículo en el que demostraba que el método podía detectar especies raras y amenazadas, como las de baja abundancia en Europa, entre ellas anfibios, mamíferos como la nutria, crustáceos y libélulas. “Demostramos que bastaba un vaso de agua para detectar estos organismos”, explica a Undark. Estaba claro: el método tenía aplicaciones directas en biología de la conservación para la detección y seguimiento de especies.

En 2012, la revista *Molecular Ecology* publicó un número especial sobre ADN, y Taberlet y varios colegas esbozaron una definición práctica de ADN como cualquier ADN aislado de muestras ambientales. El método describía dos enfoques similares, pero ligeramente diferentes: Uno puede responder a una pregunta de sí o no: ¿Está presente la rana toro (o lo que sea) o no? Lo hace escaneando el metafórico código de barras, secuencias cortas de ADN que son particulares de una especie o familia, llamadas cebadores; el escáner de comprobación es una técnica común llamada reacción en cadena de la polimerasa cuantitativa en tiempo real, o qPCR.

Los científicos utilizan el ADN para rastrear criaturas de todas las formas y tamaños, ya sean minúsculos trozos de algas invasoras, anguilas del lago Ness o un topo que vive en la arena y no ha sido visto en casi 90 años.

Otro método, conocido como **metacódigo de barras del ADN**, consiste básicamente en obtener una lista de los organismos presentes en una muestra determinada. “En cierto modo se pregunta: “¿Qué hay aquí?” dice Thomsen. “Y entonces se obtienen todas las cosas conocidas, pero también algunas sorpresas, ¿verdad? Porque había algunas especies que no sabías que estaban presentes”.

El ADN difiere de las técnicas de muestreo más tradicionales, en las que los organismos, como los peces, se capturan, manipulan, estresan y a veces mueren. Los datos obtenidos son objetivos; están estandarizados y son imparciales.

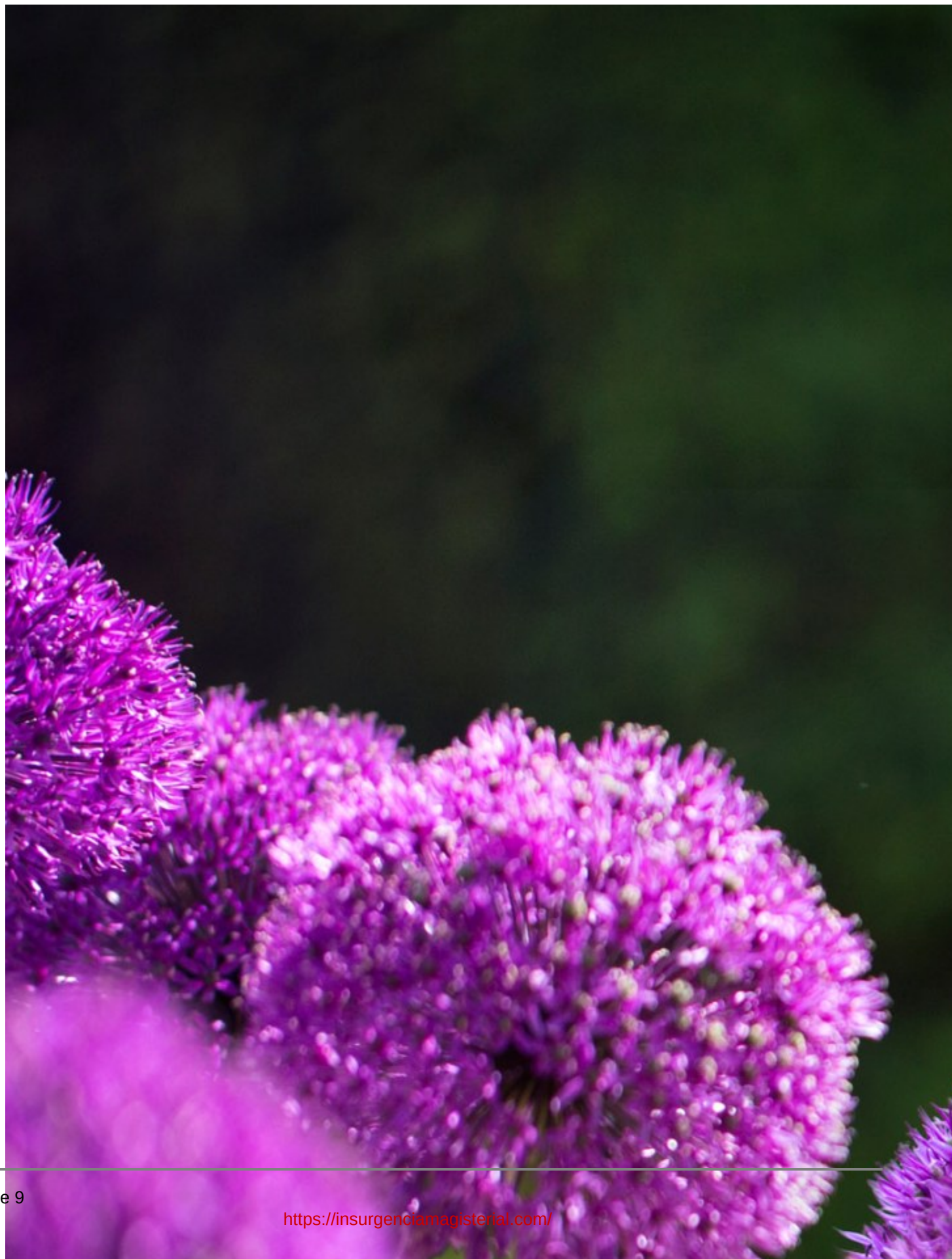
“De una forma u otra, el ADN va a seguir siendo una de las metodologías más importantes de las ciencias biológicas”, afirma Mehrdad Hajibabaei, biólogo molecular de la Universidad de Guelph, pionero en el método de metacódigo de barras del ADN, que ha rastreado peces a unos 3.000 metros bajo el mar del

Labrador. “Cada día veo surgir algo que no se me había ocurrido”.

En los últimos años, el campo del ADN se ha ampliado. La sensibilidad del método permite a los investigadores tomar muestras de entornos antes inalcanzables, por ejemplo, capturando ADN desde el aire, un enfoque que pone de relieve las promesas del ADN y sus posibles escollos. El ADN aerotransportado parece circular por un cinturón de polvo global, lo que sugiere su abundancia y omnipresencia, y puede filtrarse y analizarse para controlar plantas y animales terrestres. Pero el ADN que sopla en el viento puede conducir a una contaminación inadvertida.

En 2019, Thomsen, por ejemplo, dejó dos botellas de **agua ultrapura** al aire libre: una en una pradera y la otra cerca de un puerto marino. Al cabo de unas horas, el agua contenía ADN detectable asociado a aves y arenques, lo que sugiere que restos de especies no terrestres se asentaron en las muestras; obviamente, los organismos no habitaban en las botellas. “Así que deben proceder del aire”, declaró Thomsen a Undark. Los resultados plantean un doble problema: por un lado, los rastros pueden desplazarse, ya que dos organismos que entran en contacto pueden transportar el ADN del otro, y el hecho de que cierto ADN esté presente no significa que la especie esté realmente allí.

Además, tampoco hay garantías de que la presencia de ADN ambiental indique que una especie está viva, y siguen siendo necesarios estudios de campo, dijo, para conocer el éxito reproductor de una especie, su salud o el estado de su hábitat. Hasta ahora, pues, el ADN no sustituye necesariamente a las observaciones o recolecciones físicas. En otro estudio, en el que el grupo de Thomsen recogió ADN de flores para buscar aves polinizadoras, más de la mitad del ADN recogido procedía de seres humanos, una contaminación que podía enturbiar los resultados y dificultar la detección de los polinizadores en cuestión.



Los investigadores pueden tomar muestras de comunidades enteras, por ejemplo, observando el ADN de las flores como un indicador de todos los pájaros, abejas y otros animales polinizadores que las visitan. Pero algunas investigaciones han revelado la presencia de cantidades significativas de ADN humano en esas muestras, contaminación que puede enturbiar los resultados. GARY PEEPLES/USFWS

Del mismo modo, en mayo de 2023, un equipo de la Universidad de Florida que antes estudiaba las tortugas marinas por los rastros de ADN que dejan al arrastrarse por la playa publicó un artículo en el que aparecía ADN humano. Las muestras estaban lo bastante intactas como para detectar mutaciones clave que algún día podrían utilizarse para identificar a personas concretas, lo que sugiere que la vigilancia biológica también planteaba cuestiones sin respuesta sobre las pruebas éticas en humanos y el consentimiento informado. Si el ADN sirvió de red de cerco, entonces barrió indiscriminadamente información sobre la biodiversidad e inevitablemente acabó con, como dice el artículo del equipo de la UF, “capturas accidentales genéticas humanas”.

Mientras que las cuestiones de privacidad en torno a las huellas en la arena, hasta ahora, parecen existir sobre todo en el terreno de lo hipotético, el uso del ADN en litigios legales relacionados con la fauna salvaje no sólo es posible, sino que ya es una realidad. También se está utilizando en investigaciones criminales: En 2021, por ejemplo, un grupo de investigadores chinos informó de que el ADN ambiental recogido de los pantalones de un presunto asesino había revelado, en contra de sus afirmaciones, que probablemente había estado en el canal fangoso donde se había encontrado un cadáver.

La preocupación que suscita el ADN ambiental fuera del objetivo, en términos de precisión y de su alcance en la medicina humana y forense, pone de relieve otra deficiencia mucho más amplia. Como Hanner, de la Universidad de Guelph, describió el problema: “Nuestros marcos reguladores y nuestra política tienden a ir al menos una década o más por detrás de la ciencia”.

“Todos los días veo surgir algo que no se me había ocurrido”.

Hoy en día, existen innumerables [aplicaciones regulatorias potenciales](#) para el monitoreo de la calidad del agua, la evaluación del impacto ambiental (incluidos los

parques eólicos marinos y las perforaciones de petróleo y gas hasta el desarrollo de centros comerciales comunes y corrientes), la gestión de especies y la aplicación de la Ley de Especies en Peligro de Extinción. En un [caso judicial civil](#) presentado en 2021, el Servicio de Pesca y Vida Silvestre de EE. UU. evaluó si existía un pez en peligro en una cuenca en particular, utilizando ADN y un muestreo más tradicional, y descubrió que no era así. Los tribunales dijeron que la falta de protección de la agencia para esa cuenca estaba justificada. La cuestión no parece ser si el ADN se sostuvo en los tribunales; lo hizo. “Pero realmente no se puede decir que algo no existe en un medio ambiente”, dijo Hajibabaei.

Incluso con un marco analítico riguroso, dijo, los problemas con los **falsos negativos y los falsos positivos** son particularmente difíciles de resolver sin hacer una de las cosas que el ADN obvia: la recogida más tradicional y la inspección manual. A pesar de las limitaciones, un puñado de empresas ya están empezando a comercializar la técnica. Por ejemplo, las aplicaciones futuras podrían ayudar a una empresa a confirmar si el puente que está construyendo dañará a algún animal local en peligro de extinción; a una empresa de acuicultura a determinar si las aguas donde cría sus peces están infestadas de piojos de mar; o a un terrateniente que tenga curiosidad por saber si las nuevas plantaciones atraen a una mayor variedad de abejas autóctonas.

El problema es fundamental, dada la reputación del ADN como método indirecto de detectar lo indetectable, o como solución en contextos en los que simplemente no es posible sumergir una red y capturar todos los organismos del mar. “Es muy difícil validar algunas de estas hipótesis”, afirma Hajibabaei.

El ADN abre muchas posibilidades para responder a la pregunta planteada originalmente por Barkay -y sin duda por muchos otros- (“¿quién está ahí?”), pero cada vez da más pistas para responder también a la pregunta: “¿qué hacen ahí?”

Elizabeth Clare, profesora de biología de la Universidad York de Toronto, estudia la biodiversidad y explica que ha observado murciélagos que se posan en un lugar durante el día y que, recogiendo ADN en el aire, puede deducir dónde socializan por la noche. En otro estudio, el ADN ambiental de perros domésticos apareció en excrementos de zorros rojos. Los dos cánidos no parecían cruzarse, pero los investigadores se preguntaron si su proximidad había dado lugar a confusión o contaminación cruzada, antes de decantarse por otra explicación: al parecer, los zorros comían caca de perro.

Así pues, aunque el ADN no revela intrínsecamente el comportamiento de los animales, en algunos aspectos este campo está avanzando hacia la obtención de pistas sobre lo que un organismo puede estar haciendo y cómo está interactuando con otras especies en un entorno determinado, obteniendo información sobre la salud sin observar directamente el comportamiento.

Otra posibilidad es la **biovigilancia a gran escala**. De hecho, en los últimos tres años, más personas que nunca han participado en un audaz experimento que ya está en marcha: la recogida de muestras ambientales de las alcantarillas públicas para rastrear partículas víricas Covid-19 y otros organismos que infectan a los seres humanos. Técnicamente, el muestreo de aguas residuales implica un enfoque relacionado llamado eARN, porque algunos virus sólo tienen información genética almacenada en forma de ARN, en lugar de ADN. Aun así, se aplican los mismos principios. (Los estudios también sugieren que el ARN, que determina qué proteínas está expresando un organismo, podría utilizarse para evaluar la salud del ecosistema; los organismos que están sanos pueden expresar proteínas totalmente diferentes en comparación con los que están estresados). Además de controlar la prevalencia de enfermedades, la vigilancia de las aguas residuales demuestra cómo una infraestructura existente diseñada para hacer una cosa -las alcantarillas se diseñaron para recoger residuos- puede convertirse en una poderosa herramienta para estudiar otra cosa, como la detección de patógenos.

Clare tiene la costumbre de hacer precisamente eso. “Soy una de esas personas que tienden a utilizar las herramientas, pero no de la forma para la que fueron concebidas”, afirma. Clare fue una de las investigadoras que detectó una laguna en la investigación: Había muchos menos trabajos sobre ADN de organismos terrestres. Así que empezó a trabajar con lo que podría llamarse un filtro natural, es decir, gusanos que chupan la sangre de los mamíferos. “Es mucho más fácil recoger

1.000 sanguijuelas que encontrar otros animales. Estas tienen sangre en su interior y la sangre lleva el ADN de los animales con los que interactuaron”, explica. “Es como tener a un montón de ayudantes de campo investigando por ti”. Entonces, uno de sus alumnos pensó lo mismo para los escarabajos peloteros, que son aún más fáciles de recolectar.

Clare lidera ahora una nueva aplicación para otro sistema de monitorización continua: aprovechar los monitores de calidad del aire existentes que miden contaminantes, como las partículas finas, y al mismo tiempo aspiran ADN del cielo. A finales de 2023, sólo disponía de un pequeño conjunto de muestras, pero ya había descubierto que, como subproducto de la vigilancia rutinaria de la calidad del aire, estas herramientas preexistentes funcionaban como filtros para el material que ella buscaba. Se trataba, más o menos, de una red transcontinental regulada que recogía muestras de forma muy constante durante largos periodos de tiempo. “Con ella se podían crear series temporales y datos de alta resolución de continentes enteros”, explica.



Un investigador examina el equipo de una estación de medición de la contaminación en Londres, Inglaterra, que se colocó originalmente en 1996. Las estaciones rutinarias de control de la calidad del aire son, más o menos, una red transcontinental de filtros para el ADN que funcionan de forma constante durante largos periodos de tiempo. LEON NEAL/GETTY IMAGES

Sólo en el Reino Unido, según Clare, se calcula que hay unos 150 emplazamientos diferentes que aspiran una cantidad conocida de aire, cada semana, durante todo el año, lo que supone unas 8.000 mediciones anuales. Clare y sus coautores analizaron recientemente un pequeño subconjunto de estas mediciones (17 en dos lugares) y pudieron identificar más de 180 grupos taxonómicos distintos, más de 80 tipos diferentes de plantas y hongos, 26 especies diferentes de mamíferos, 34 especies diferentes de aves y al menos 35 tipos de insectos.

Sin duda, existen otros lugares de investigación ecológica a largo plazo. Estados Unidos cuenta con una red de instalaciones de este tipo. Pero su ámbito de estudio no incluye una infraestructura distribuida por todo el mundo que mida la biodiversidad constantemente, desde el paso de las aves migratorias por encima de la cabeza hasta la expansión y contracción de las especies con el cambio climático. Podría decirse que el ADN complementará, más que suplantará, la red distribuida de personas que registran en tiempo real observaciones tempoespaciales de alta resolución en sitios web como eBird o iNaturalist. Al igual que una imagen borrosa de una galaxia completamente nueva, la resolución actual sigue siendo baja.

“Es una especie de sistema de recopilación generalizado, algo prácticamente inaudito en la ciencia de la biodiversidad”, afirma Clare, en referencia a la capacidad de extraer señales de ADN de la nada. Su opinión se puede aplicar a este método en su conjunto: “No es perfecto. pero realmente no hay nada más que haga esto”.

[LEER EL ARTÍCULO ORIGINAL PULSANDO AQUÍ](#)

Fotografía: Technology review

Fecha de creación

2024/04/13