

ROTENONA: Una herramienta esencial pero difamada para la evaluación de la diversidad de los peces marinos.**D. ROSS ROBERTSON Y WILLIAM F. SMITH-VANIZ**

Los arrecifes coralinos, uno de los ecosistemas biológicamente más diversos e importantes de la Tierra, están experimentando un incremento y sin precedentes de disminución ecológica aunque las faunas de los peces de estos arrecifes y de otros hábitats siguen sin conocerse en detalle. La rotenona, una sustancia natural tradicionalmente utilizada por pescadores de subsistencia, es una herramienta única y eficiente para colectar muestras de peces de arrecife y de otras zonas costeras para la investigación marina. Desafortunadamente, este muestreo se percibe como muy destructivo, y en muchos países el aumento de las prohibiciones en contra del uso de rotenona en poco tiempo dejará a la investigación sobre la biodiversidad de peces coralinos a nivel mundial sin este recurso. En este artículo se aclaran ideas equivocadas comunes sobre los efectos ambientales que el muestreo con rotenona a pequeña escala tiene en la investigación marina.

Palabras clave: peces de arrecifes coralinos, investigación sobre la biodiversidad, muestreo con rotenona.

D. Ross Robertson (e-mail: drr@stri.org) trabaja en el Instituto Smithsonian de Investigaciones Tropicales en Balboa, Republica de Panamá. William F. Smith-Vaniz (e-mail: smithvaniz@gmail.com) esta asociado con el Florida Museum of Natural History en la University of Florida en Gainesville. © 2008 American Institute of Biological Sciences.

La rotenona es un químico natural producido por plantas leguminosas originarias del Suroeste de Asia y de América del Sur y ha sido tradicionalmente utilizado por los pescadores indígenas de subsistencia en aguas dulces y marinas de esas áreas (Bearez 1998, Lockett 1998, Ling 2003). La rotenona mata a los peces y a otros organismos al bloquearles la ingesta celular de oxígeno (Singer y Ramsay 1994). Los administradores de las pesquerías de agua dulce la utilizan rutinariamente en cantidades de hasta cientos de toneladas métricas para eliminar las especies exóticas y ayudar a conservar los peces nativos y también para eliminar peces inadecuados antes de sembrar un cuerpo de agua con peces que apoyan la pesca deportiva (McClay 2000, Ling 2003).

La rotenona es el ingrediente activo en los insecticidas orgánicos comúnmente utilizado en mascotas y en jardines en los hogares, así como en la agricultura y en la cría de animales. Información sobre el uso de rotenona como pesticida, extraída de informes del gobierno y de una amplia gama de estudios y literatura auditada por pares y sobre las implicaciones de su uso en la salud humana y en el ambiente, está disponible en las siguientes fuentes: La Organización Mundial de la Salud, (WHO por sus siglas en inglés) (WHO; www.who.int/ipcs/publications/pesticides_hazard_rev_3.pdf), la Red Toxicológica de Extensión (Extension Toxicology Network; <http://extoxnet.orst.edu/pips/rotenone.htm>), y la Sociedad Americana de Pesquerías (American Fisheries Society, AFS; www.fisheries.org/units/rotenone/index.htm); e informes importantes de la Agencia para la Protección Ambiental de los Estados Unidos (US Environmental Protection Agency) también están disponibles en el sitio de la Sociedad Americana de Pesquerías; ver también revisiones de Lockett (1998) y Ling (2003). En resumen, estas fuentes consideran la rotenona como un pesticida relativamente seguro que se puede utilizar en la agricultura y en la cría de animales. No hay claras evidencias que sea cancerígeno o teratogénico en ratas. La Organización Mundial de la Salud clasifica la rotenona, junto con la piretrina, otro insecticida orgánico de uso doméstico común, como moderadamente peligroso: está categorizado en un nivel 3 en una escala de 1 (más tóxico) a 4 (menos tóxico). Cuando es ingerido en grandes cantidades, la

rotenona tiene baja toxicidad en aves, pero es moderadamente tóxica en ratas. El principal peligro para la salud humana asociado con el uso de rotenona en la administración de la pesca (y en la investigación) proviene de la inhalación del polvo o el aerosol, lo cual puede prevenirse utilizando respiradores. Los peces muertos debido a la rotenona retienen una pequeña cantidad de la sustancia, principalmente las partes no comestibles del cuerpo. No se han reportado efectos en humanos que consumen peces que han sido colectados utilizando rotenona y ambos autores han consumido peces colectados de esta manera sin mostrar efectos notables e inmediatos. Además, debido a que la rotenona es térmicamente lábil, la cocción reduce el riesgo potencial para los humanos que consumen peces expuestos a la sustancia. No es probable que se lleven a cabo estudios a gran escala y rigurosamente diseñados de cualquier efecto a largo plazo producidos en humanos por el consumo de peces expuestos a la rotenona, ya que son costosos y son usualmente restringidos a pesticidas utilizados en países desarrollados, en los cuales el uso de rotenona está altamente regulado y el uso por parte de los pescadores es ilegal. La Sociedad Americana de Pesquerías sostiene que un estudio experimental que encontró daño cerebral y síntomas parecidos a la enfermedad de Parkinson en ratas luego de inyecciones intravenosas continuas de rotenona (Betarbet et al. 2000) tiene una dudosa relación con el uso de rotenona en la administración de las pesquerías. La evaluación de ese estudio por parte de la AFS (ver www.fisheries.org/units/rotenone/index.htm; ver también Ling [2003]) señaló que (a) la rotenona no es absorbida por el sistema digestivo de los mamíferos y es rápidamente degradada por el hígado; (b) en el estudio de Betarbet y sus colegas (2000), el envío de rotenona al cerebro de las ratas requirió de la inyección intravenosa; (c) en estudios anteriores, no se produjeron síntomas parecidos a los del Parkinson o cambios anatómicos en ratas que fueron alimentadas con rotenona durante un largo período; y (d) a lo largo de muchas décadas, no hay evidencia de ningún vínculo ente el uso de rotenona en la administración de las pesquerías y en la enfermedad de Parkinson en humanos.

A nivel mundial han aumentado las restricciones para el uso de rotenona en la investigación marina. En muchos países en los centros globales de diversidad con zonas costeras tropicales y subtropicales, se prohíbe o se restringe enérgicamente a los investigadores el uso de rotenona para recoger muestras de arrecifes y peces costeros. Una lista parcial incluye a los Estados Unidos (el área de tierra firme, las Islas Vírgenes y Hawaii), en donde la rotenona se usa legalmente en gran escala en la administración de la pesca y en la recuperación de las poblaciones de los peces nativos de agua dulce; México, Belice, Honduras, Colombia, Ecuador, Venezuela, las Islas Caimán, Brasil, en donde la rotenona ha sido históricamente utilizada por los pescadores indígenas de subsistencia; la Polinesia Francesa; Japón; Palau; Australia; Nueva Zelanda; India; y Sudáfrica. Creemos, como demostramos aquí, que tales prohibiciones o restricciones innecesarias derivan de una falta de información por parte de los administradores sobre la necesidad de recoger muestras con rotenona a baja escala y a una falta de conciencia sobre la naturaleza temporal y trivial de los efectos colaterales de dicho muestreo en el ambiente.

El muestreo con rotenona genera información esencial sobre la biodiversidad marina. La taxonomía es fundamental para entender la biodiversidad y los procesos evolutivos, y desempeña un rol importante en la biología de la conservación (Dubois 2003), hechos que los administradores a menudo no aprecian pero que deben tomarse en consideración. Toda investigación biológica requiere de una identificación precisa de las especies, la cual depende de que los sistemáticos de los museos tengan suficientes especímenes recolectados en áreas extensas y a través del tiempo (Cotterill 1995). Los especímenes tipo son esenciales para la investigación sobre la biodiversidad de los peces costeros; en su taxonomía (morfológica y genética); y en sus respuestas, ecológicas, evolutivas, biogeográficas y de población, al cambio climático. El muestreo con rotenona ha sido crucial para el desarrollo de todas las guías modernas de identificación regional de peces costeros tropicales, las cuales necesariamente incluyen peces crípticos. Estas guías, incluida la de Randall (2007) y sus nueve guías anteriores de identificación regional sobre los peces de los arrecifes del Indo – Pacífico y Atlántico (ver también Carpenter [2002] y tres guías regionales anteriores de peces tropicales del Indo – Pacífico, emitidas por la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, [FAO por sus siglas en inglés]), demuestran la importancia de dicho muestreo para entender la biodiversidad de los peces de las costas tropicales a nivel mundial. Sin embargo, no se han tomado muestras de grandes áreas en los trópicos, y aún dista mucho de estar claro cuántas especies de peces de las costas tropicales existen en áreas que han sido relativamente bien muestreadas (ver Zapta y Robertson [2006]). Además, es necesaria más información derivada de muestreos con rotenona sobre el uso del hábitat, la ecología y las distribuciones geográficas de los peces costeros, para la conservación y el manejo de esos peces – los organismos más vulnerables a la extinción local o global por condiciones adversas son aquellos con ámbitos geográficos pequeños y hábitats especiales y otros requerimientos

ecológicos. Según Gerald R. Allen del *Western Australian Museum en Perth* (comunicación personal, 13 de junio de 2007), el muestreo con rotenona reveló ser esencial para sus recientes reconocimientos sobre la biodiversidad como apoyo a las actividades de conservación en lugares clave en Filipinas, Indonesia, Papua Nueva Guinea, y las Islas Salomón. Combinado con reconocimientos visuales, dicho muestreo representó ser una herramienta poderosa para obtener una completa “foto instantánea” de la fauna en cada sitio específico donde se hizo el reconocimiento. Allen ha usado el muestreo con rotenona con regularidad durante los últimos 10 años como parte de “evaluaciones biológicas rápidas” en esas áreas.

Estas evaluaciones son un elemento clave en las estrategias de conservación empleadas por organizaciones como *Conservación Internacional* (CI), *The Nature Conservancy* (TNC) y la *Asociación para la Defensa de la Naturaleza* (WWF por sus siglas en inglés). Dicho muestreo jugó una parte importante en reconocimientos conducidos por CI y TNC en las Islas Raja Ampat, fuera de la costa occidental de Nueva Guinea. La combinación de reconocimientos visuales y de pequeñas estaciones de rotenona en esas islas le permitió al equipo de Allen producir una lista impresionante de más de 1100 especies de peces de esa área, evidencia innegable que esta área se encuentra entre las más ricas en el mundo en cuanto a peces tropicales de arrecife. Como resultado directo de esta documentación, se está estableciendo una red de seis áreas marinas protegidas en esas islas – un resultado que no habría sido posible sin el muestreo con la rotenona.

Uso de rotenona en la investigación marina. Históricamente, los investigadores han utilizado tres formulaciones diferentes de rotenona para recolectar peces (1) preparaciones acuosas débiles, que consisten de raíz pulverizada (concentración de 5 a 8 por ciento) mezclada con agua para producir una lechada, a menudo con jabones biodegradables de uso casero para aumentar la emulsión del polvo; (2) preparaciones comerciales líquidas diluidas a base de petróleo compuestas de resina de rotenona (hasta 50 por ciento de concentración) en una mezcla de solventes de petróleo y emulsionantes que permiten que la preparación líquida se mezcle con agua; y (3) la rotenona cristalina al 97 por ciento disuelta en alcohol o acetona (Gilmore et al. 1981, McClay 2000). Las preparaciones comerciales a base de petróleo, las cuales se usan comúnmente en la administración de la pesca de agua dulce (McClay 2000), son costosas, no confiables después de un almacenamiento prolongado y debido a su inflamabilidad, son peligrosas para transportar. La rotenona cristalina es extremadamente cara. Por estas razones, los investigadores marinos por lo general utilizan preparaciones acuosas. Al muestrear arrecifes y peces costeros, los colectores esparcen manualmente en el fondo una pequeña cantidad de la lechada acuosa de rotenona (aproximadamente 1 kilogramo de polvo mezclado con varios litros de agua). En arrecifes de aguas abiertas, con esta cantidad se pueden muestrear peces en un área de aproximadamente 10 metros de diámetro por menos de una hora, después de la cual la rotenona se ha dispersado a tal

punto que es inefectiva contra los peces que entran en el área tratada. Este muestreo típicamente está limitado a áreas de bajo flujo de agua debido a que muchas especies de peces son resistentes a la rotenona (algunas requieren aproximadamente 20 minutos de exposición para poderlas colectar) y la rotenona se dispersa muy rápidamente cuando el flujo de la corriente es de moderado a alto.

El muestreo con rotenona es uno de un conjunto de herramientas complementarias—no alternativas—de investigación. Los reconocimientos visuales proporcionan información precisa sobre las especies visibles en las aguas claras de los arrecifes coralinos, pero no sobre especies en ambientes turbios como estuarios y manglares, o de peces crípticos que viven ocultos en las grietas o tubos en los arrecifes, en los manglares, en la arena, o en el lodo. Los reconocimientos realizados con rotenona sí proveen información amplia sobre peces crípticos y de hábitat turbios; también mejoran grandemente la colecta de peces de arrecifes profundos. Richard Pyle del Bishop Museum en Hawai (comunicación personal, 15 de junio de 2007), es uno de un grupo pequeño de buzos científicos a nivel mundial, que utiliza *recicladores de aire* para colectar muestras de peces de arrecife a profundidades entre 45 y 150 metros. En su experiencia, los muestreos hechos con rotenona a esas profundidades triplica la velocidad del descubrimiento de nuevas especies de peces crípticos de arrecifes profundos (ejemplo, ver Smith-Vaniz [2005] para la descripción de una de esas especies y para la información sobre la colección con *recicladores de aire*). John E. McCosker, de la *California Academy of Sciences en San Francisco* (comunicación personal, 12 de junio de 2007), sostiene que los reconocimientos con rotenona son esenciales para el muestreo efectivo de hábitat muy profundos (> 150 metros) mediante el uso de submarinos de investigación, los cuales utilizan un brazo flexible para descargar rotenona desde un reservorio abordo, hasta una pequeña cueva o área en el fondo.

Los peces crípticos costeros pertenecen a una gama amplia de familias de peces que constituyen casi la mitad de las especies de la fauna de peces costeros de la región Neotropical (ver Carpenter [2002]), Robertson y Allen [2006]), y tienen similar importancia en las faunas de peces costeros en todas las zonas tropicales. El muestreo con rotenona revela especies crípticas que usualmente no se detectan en los reconocimientos visuales de un área (Harmelin-Vivien et al. 1985, Dibble 1991, Lockett 1998, Ackerman y Bellwood 2000, Collette et al. 2003, Dennis et al. 2005, Smith-Vaniz et al. 2006), aunque Willis (2001) encontró seis veces más especies usando rotenona. Los reconocimientos visuales no sólo fallan en documentar la incidencia de muchos peces crípticos de arrecifes sino que subestiman grandemente las densidades de poblacionales de dichos peces. Por ejemplo, Ackerman y Bellwood (2000) censaron visualmente pequeñas áreas antes del muestreo con rotenona y colectaron de 50 a 75 por ciento más individuos usando rotenona; Willis (2001) y Dibble (1991) recolectaron de 4 y 16 veces más, respectivamente (ver también Brock [1982] y Kulbiki [1990]).

La recolección con anestésicos, tales como quinaldine y aceite de clavo de olor, es efectiva cuando se riegan pequeñas

cantidades utilizando una botella de plástico que se oprime a cada individuo que se les puede llegar de cerca. Sin embargo, en general, los anestésicos son mucho menos efectivos que la rotenona para colectar peces ocultos, los cuales salen de sus escondites (y se pueden colectar) cuando se les expone a la rotenona, pero usualmente no lo hacen cuando se les anestesia. Además, la rotenona produce una desorientación más duradera que los anestésicos en los peces, lo cual permite que se puedan colectar más fácilmente (Ackerman y Bellwood 2002). En adición, la mayor parte de los anestésicos requieren el uso de solventes como el alcohol o la acetona. Aunque los anestésicos pueden ser usados para recoger muestras en pequeñas áreas tales como piscinas intermareales rocosas (Griffiths 2000), el uso de anestésicos en grandes cantidades necesarias en ese muestreo implica la liberación de solventes en cantidades que probablemente afectan adversamente a organismos que no son peces.

El resto de las técnicas de colecta tienen limitaciones considerables para recoger muestras de peces costeros: los explosivos son generalmente destructivos; las trampas y las redes son altamente selectivas de acuerdo a los tipos de peces capturados y pueden destruir algunos hábitat; y la electropesca no funciona en el agua salada. Como la rotenona, la antimicina ha sido usada para colectar peces; sin embargo, este antibiótico es más tóxico que la rotenona para una amplia gama de organismos, es sustancialmente más tóxico que la rotenona para los mamíferos, es altamente variable en su acción contra diferentes especies de peces, y es inefectivo en condiciones de PH elevado como ocurre en los manglares y en otros hábitats marinos (Marking 1992).

Por nuestras experiencias y por la de otros colegas que colectan peces costeros, el muestreo con rotenona es el método más efectivo para recoger una amplia gama de peces crípticos costeros que se encuentran en aguas turbias y en aguas profundas al realizar muestreos sobre la biodiversidad.

La rotenona es altamente selectiva para los peces. La rotenona tiene baja toxicidad en las aves, y las aves marinas no muestran efectos adversos luego de consumir peces afectados por la rotenona durante colectas para la investigación (John E. McCosker, comunicación personal, 15 de junio de 2007); en todo caso, los peces retienen muy poca rotenona en sus tejidos. Además de los peces, la rotenona afecta principalmente a pequeños crustáceos planctónicos, y una típica estación de colección con rotenona rinde para cantidades limitadas de estrellas de mar quebradizas, camarones bentónicos y pulpos, los cuales a su vez son útiles para la investigación (Bussing 1972, Lockett 1998, Ling 2003; Gerald R. Allen, comunicación personal, 12 de junio de 2007; John E. Randall, Bishop Museum, Honolulu, comunicación personal, 13 de junio de 2007).

Los pocos experimentos pertinentes que se han llevado a cabo no detectaron efectos deletéreos en los corales expuestos a la rotenona diluida utilizada por los investigadores. Jaap y Wheaton (1975) encontraron que la solución no diluida (máxima concentración) de rotenona líquida a base de petróleo, en vez de dispersarse correctamente, formó gotas que se recogieron y permanecieron sobre las superficies horizontales de los corales duros. Esto causó una “mortalidad parcial” de colonias de corales, en las cuales parches de tejidos

murieron pero la colonia entera no. El coral puede regenerar el área muerta del esqueleto. No hubo tales efectos de rotenona en su máxima concentración sobre los corales suaves, los cuales, a diferencia de los corales duros, crecen en forma vertical y no retienen gotas de la solución de rotenona. Esos autores no encontraron en los corales duros y suaves efectos de la solución diluida de rotenona a base de petróleo cuando se dispersó normalmente. Debido a que los investigadores que colectan peces diluyen la rotenona antes de utilizarla bajo el agua, y debido a que se dispersa rápidamente en las estaciones de colección, los corales no experimentan contacto prolongado con la rotenona concentrada durante la colecta para investigación.

En otros estudios de campo de peces de arrecifes en los cuales se emplearon las típicas estaciones pequeñas de rotenona, no se observaron efectos adversos en los corales. Por ejemplo, Bright y sus colegas (1974) no encontraron efectos luego de usar rotenona a base de petróleo bajo una "tienda" de plástico a la cual le colocaron peso alrededor del borde para cerrar el área del fondo, limitando así la dispersión de rotenona alrededor de una hora antes de removerla para permitirle a los científicos trabajar en el área. Smith (1973) usó rotenona a base de petróleo para muestrear repetidamente parches coralinos hasta tres veces en un período de hasta 3 años, y no notó efectos adversos en los corales (C. Lavett Smith, American Museum of Natural History, New York, comunicación personal, 13 de junio de 2007).

Además de los peces, los únicos organismos macroscópicos que murieron por la aplicación de rotenona a base de petróleo en una gran poza de mareas en un arrecife en el centro del Pacífico, fueron camarones y pulpos (pero no los cangrejos; Bussing 1972). El personal administrativo del Parque Nacional llevó a cabo una evaluación de seguimiento para medir los efectos colaterales del muestreo con rotenona acuosa realizado por Smith-Vaniz y sus colaboradores (2006) en las Islas Vírgenes Americanas y no observaron efectos adversos en los corales (Z. Hillis-Starr, *Buck Island Reef National Monument*, St. Croix, comunicación personal, 18 de junio de 2007).

Al no observar efectos en corales brevemente expuestos a rotenona diluida en una estación de colecta común es congruente con nuestras propias observaciones a lo largo de muchos años de colectar muestras. Tanto nosotros como otros investigadores que hemos usado rotenona, ya sea acuosa o a base de petróleo, (e.g., Gilmore et al. 1981) hemos observado menos mortalidad de invertebrados con las preparaciones acuosas, lo cual indica que los productos a base de petróleo usados en las preparaciones comerciales de rotenona son tóxicos para los invertebrados y para los peces. Limitar las colectas científicas en aguas poco profundas al uso de rotenona acuosa no obstaculizaría las investigaciones. La rotenona a base de petróleo es lo más útil para las colectas en aguas profundas porque los científicos buzos que recogen muestras allí (sólo un puñado en todo el mundo) cuentan con poco tiempo para terminar su trabajo, y las temperaturas más bajas reducen dramáticamente la efectividad de la rotenona acuosa (Richard L. Pyle, comunicación personal, 15 de junio de 2007; John E. McCosker, comunicación personal, 12 de junio de 2007).

El muestreo con rotenona no elimina a todos los peces ni destruye su hábitat. Colectar muestras desde pequeñas estaciones de rotenona en aguas abiertas no mata a todos los peces del área. Los peces deben permanecer dentro del área tratada por algún tiempo para que se les pueda colectar, y los peces grandes, que se desplazan y se mueven brevemente dentro de un área tratada, no son afectados. Muchos peces que se mueven evitan la rotenona y abandonan el área tratada temporalmente hasta que la rotenona se haya dispersado, aunque los pequeños meros son atraídos a los sitios de colecta para cazar a los peces desorientados. Los reconocimientos visuales pueden proporcionar información adecuada sobre los peces de arrecifes sin representación en los muestreos con rotenona para evitar tales reacciones. En los muestreos con rotenona para evaluar primordialmente la presencia de especies de peces crípticos, es preferible la huída de los peces visibles y que se mueven. Si existe la necesidad de retener a los peces que se mueven (por ejemplo, cuando se calcula la abundancia de una comunidad), se pueden instalar redes de retención alrededor del área de muestreo antes de administrar la rotenona (e.g., Ackerman y Bellwood 2000). Además, los peces se recuperan de una ligera intoxicación por rotenona (Schultz 1948, Bussing 1972, Smith 1973, Ling 2003). De hecho, Galzin (1979) utilizó exitosamente la rotenona como un anestésico en peces de arrecifes coralinos, con una botella comprimible envió pequeñas cantidades de material altamente diluido a peces individualmente hasta que estuvieran suficientemente desorientados para ser capturados con una red de acuario, luego fueron etiquetados y liberados. Un mes después de su captura con rotenona, observó 95 por ciento de los peces etiquetados en el campo.

Finalmente, en contraste con los métodos mecánicos de colecta tales como la toma de muestras por arrastre, los cuales pueden destruir o perturbar grandes áreas de comunidades sésiles bentónicas que constituyen un hábitat para los peces, el muestreo realizado por buzos utilizando rotenona no destruye físicamente los hábitats marinos.

La rotenona se dispersa y se degrada rápidamente.

Las burbujas producidas durante el buceo, en combinación con el movimiento natatorio de los buzos, pronto llevan agua y rotenona lejos del lugar donde fue aplicada. Una hora de actividad de un par de buzos que recogen muestras en un lugar de recolección en aguas abiertas en el cual no hay corriente, es suficiente para dispersar la rotenona a un punto que no afecte a los peces que entran en el área previamente tratada. Las corrientes de agua aceleran grandemente el proceso de dispersión.

Información sobre la degradación de rotenona en ambientes acuáticos y terrestres está disponible en las mismas fuentes que suministran información sobre el uso de rotenona como pesticida (ver arriba). Es ampliamente reconocido que la rotenona es químicamente inestable y se degrada rápidamente en el ambiente a través de mecanismos abióticos (fotólisis e hidrólisis). La velocidad de la degradación de rotenona en el agua es determinada principalmente por la temperatura, pero también por la turbidez y los niveles de luz, pH y oxígeno. La degradación es más rápida en aguas cálidas,

bien iluminadas y bien oxigenadas, en las cuales la misma se puede completar en menos de una semana. Aunque los estudios anteriores no han examinado específicamente la degradación de rotenona en arrecifes coralinos, los resultados de los estudios sí señalan que en condiciones como las que típicamente se asocian con los arrecifes coralinos (cálidas, claras, bien iluminadas, bien oxigenadas), la degradación completa de rotenona ocurre en pocos días. El potencial de que la rotenona se acumule biológicamente en las cadenas alimenticias es muy bajo. La rotenona tiene en los peces una vida media de alrededor de un día.

Las poblaciones de peces costeros son resistentes. Las poblaciones de peces costeros se recuperan rápidamente de desastres naturales de corta duración y de los más localizados efectos del muestreo con rotenona. El uso en gran escala de rotenona por parte de los administradores de las pesquerías puede producir cambios “permanentes” deseados en las comunidades de peces de agua dulce de lagos y reservas, ya que los peces no deseados no pueden repoblar las masas de aguas aisladas de forma natural. En contraste, las comunidades locales de peces costeros están fuertemente interconectadas por la dispersión de las larvas pelágicas producidas por la mayor parte de los peces marinos.

Las comunidades de peces de los arrecifes en áreas pequeñas fluctúan naturalmente en la composición de las especies y en la abundancia de las especies individuales, en gran parte debido a una variación interespecífica en el ritmo y en los niveles de reclutamiento pelágico de larvas a los hábitat costeros. La abundancia absoluta de una especie varía en relación a las fluctuaciones del reclutamiento y las abundancias relativas de peces diferentes (sean presas o depredadores) cambian debido a que todos los años los patrones de reclutamiento no son los mismos para todas las especies (por ejemplo, Sale 1988) —en resumen, las comunidades de peces costeros son entidades naturalmente dinámicas.

Las comunidades de organismos marinos, a lo largo de las costas del mundo sí sufren por estrés a escala global, tales como el calentamiento global, por fuerte estrés a largo plazo, tales como los causados por actividades humanas, continuas y a gran escala. Sin embargo, los ambientes costeros son altamente dinámicos y están constantemente sometidos a eventos naturales (por ejemplo, inundaciones, tormentas y huracanes) los cuales reducen las poblaciones de los peces costeros en áreas grandes, tanto destruyendo como construyendo los hábitat de los peces. La dispersión de larvas permite que las poblaciones de dichos peces se recuperen rápidamente de la despoblación natural que resulta de sucesos relativamente breves y ocasionales y también permite que las comunidades de peces costeros se vuelvan a repoblar en unos pocos meses de los efectos más limitados producidos por el muestreo a pequeña escala con rotenona. Varios estudios han documentado la recuperación de peces costeros de la defaunación que resulta de (a) eventos naturales a lo largo del Golfo de California (Thomson y Lehner 1976); (b) pruebas atómicas en la Polinesia Francesa (Planes et al. 2005); (c) remoción completa de la fauna de pozas de mareas mediante el uso de anestésicos en California (Grossman 1982); y (d)

muestreo con rotenona en el Pacífico Noreste de los Estados Unidos (Polivka y Chotkowski 1998), arrecifes del Caribe (Smith 1973, Mahon y Mahon 1994), el Golfo de México (Ross y Doherty 1994), el este de los Estados Unidos (Collette 1986), Sudáfrica (Beckley 1985), Brasil (Rosa et al. 1997), Australia (Lardner et al. 1993), y Nueva Zelanda (Willis y Roberts 1996, Roberts y Stewart 2006). En el Golfo de Aqaba, un derrame accidental de químicos que incluyó pesticidas mucho más potentes que la rotenona produjo la eliminación total de peces arrecifales en un área ciento de veces mayor que el tamaño del área muestreada en una pequeña estación de muestreo con rotenona. Gundermann y Popper (1975) monitorearon las poblaciones de peces en las cabezas del coral en esa área antes y después de ese evento y encontraron que la recuperación ocurrió entre 10 a 12 meses del derrame.

Los muestreos con rotenona son pocos, con grandes intervalos entre uno y otro y en pequeña escala. Un típico muestreo típico de biodiversidad de dos semanas, conducido por un equipo de varios colectores, hará de dos a tres colectas con rotenona por día y repartirá dicho muestreo entre varios hábitat y ubicaciones. En contraste, la red de un barco camaronero costero pequeño tomará aproximadamente dos minutos en dragar un área equivalente a la muestreada durante un reconocimiento de dos semanas sobre biodiversidad y con el arrastre, capturará muchos organismos aparte de peces y en el proceso perturbará los hábitat del fondo.

Conclusiones

El muestreo con rotenona a pequeña escala es una de las mejores herramientas disponibles para descubrir información vital sobre la biodiversidad de peces tropicales costeros. Dicho muestreo combina una fuerte selectividad y eficiencia con efectos ambientales mínimos y altamente transitorios.

Las comunidades de peces costeros son resistentes y tienen una capacidad bien demostrada para recuperarse de estrés temporal a mediana escala, tales como los causados por huracanes, así como también de estrés más breve y a mucha menor escala como los producidos por las pequeñas estaciones de rotenona. Los efectos del muestreo con rotenona a escala pequeña son imperceptibles en la escala de un sistema de arrecife, estuario o país, en relación a los efectos destructivos de eventos naturales o comparados con los efectos de una amplia gama de actividades humanas relacionadas con los peces costeros (la sobrepesca ampliamente difundida, la contaminación y la perturbación del hábitat).

Debido a que el uso de rotenona para la investigación no tiene base social o económica de influencia política, se constituye en un blanco fácil y conveniente para las prohibiciones. Sin embargo, para que sean efectivas, las decisiones científicas y administrativas deben ser tomadas sobre la base de la mejor información disponible y los mejores métodos disponibles para obtener esa información sobre la biodiversidad marina involucra el muestreo con rotenona a pequeña escala. Por lo tanto, instamos a los administradores de recursos marinos para que, de manera responsable y objetiva, tomen en consideración las solicitudes de los científicos marinos para usar rotenona en los programas de investigación

que tengan metas científicas y administrativas claramente enunciadas.

Reconocimientos

Agradecemos a las siguientes personas por sus comentarios relacionados con el borrador de este manuscrito: Gerald R. Allen, Ralf Britz, Rene Galzin, Philip C. Heemstra, Keiichi Matsuura, Richard L. Pyle, John E. Randall, Peter F. Sale, Robert R. Warner, y Richard Winterbottom. La participación de D. R. R. fue patrocinada por el Instituto Smithsonian de Investigaciones Tropicales. El interés y la participación de W. F. S.V. en este estudio es fruto de su investigación en el período que era un empleado del U.S. Geological Survey.

Referencias citadas

- Ackerman JL, Bellwood DR. 2000. Reef fish assemblages: A re-evaluation using enclosed rotenone stations. *Marine Ecology Progress Series* 206: 227–237.
- . 2002. Comparative efficiency of clove oil and rotenone for sampling tropical reef fish assemblages. *Journal of Fish Biology* 60: 893–901.
- Bearez P. 1998. FOCUS: First archaeological indication of fishing by poison in a sea environment by the Engoroy population of Salango (Manabí, Ecuador). *Journal of Archaeological Science* 25: 943–948.
- Beckley LE. 1985. Tidepool fishes: Recolonization after experimental elimination. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 85: 287–295.
- Betarbet R, Sherer T, MacKenzie G, Garcia-Osuna M, Panov A, Greenamyre J. 2000. Chronic systemic pesticide exposure reproduces features of Parkinson's disease. *Nature Neuroscience* 3: 1301–1306.
- Bright TJ, Tunnell JW, Pequegnat LH, Burke TE, Cashman CW, Cropper DA, Ray JP, Tresslar RC, Teerling J, Wills JB. 1974. Biotic zonation on the West Flower Garden Bank. Pages 3–54 in Bright TJ, Pequegnat LH, eds. *Biota of the West Flower Garden Bank*. Houston (TX): Gulf.
- Brock RE. 1982. A critique of the visual census method for assessing coral reef fish populations. *Bulletin of Marine Science* 32: 269–295.
- Bussing WA. 1972. Recolonization of a population of supratidal fishes at Eniwetok Atoll, Marshall Islands. *Atoll Research Bulletin* 154: 1–4.
- Carpenter KE. 2002. *The Living Marine Resources of the Western Central Atlantic*. FAO Species Identification Guide for Fishery Purposes. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations; American Society of Ichthyologists and Herpetologists Special Publication no. 5.
- Collette BB. 1986. Resilience of the fish assemblage in New England tidepools. *Fishery Bulletin* 84: 200–204.
- Collette BB, Williams JT, Thacker CE, Smith ML. 2003. Shore fishes of Navassa Island, West Indies: A case study on the need for rotenone sampling of reef fish biodiversity studies. *Aqua Journal of Ichthyology and Aquatic Biology* 6: 89–131.
- Cotterill FDP. 1995. Systematics, biological knowledge and environmental conservation. *Biodiversity and Conservation* 4: 183–205.
- Dennis GD, Smith-Vaniz WF, Colin PL, Hensley DA, McGehee MA. 2005. Shore fishes from the islands of the Mona Passage, Greater Antilles with comments on their zoogeography. *Caribbean Journal of Science* 41: 716–743.
- Dibble ED. 1991. A comparison of diving and rotenone methods for determining relative abundance of fish. *Transactions of the American Fisheries Society* 120: 663–666.
- Dubois A. 2003. The relationships between taxonomy and conservation biology in the century of extinctions. *Comptes Rendus Biologies* 326: S9–S21.
- Galzin R. 1979. La faune ichtyologique d'un récif corallien de Moorea, Polynésie française: Echantillonnage et premiers résultats. *Revue d'Écologie: La Terre et la Vie* 33: 623–643.
- Gilmore RG, Hastings PA, Kulczycki GR, Jennison GBL. 1981. Crystalline rotenone as a selective fish toxin. *Florida Scientist* 44: 193–203.
- Griffiths SP. 2000. The use of clove oil as an anaesthetic and method for sampling intertidal rockpool fishes. *Journal of Fish Biology* 57: 1453–1464.
- Grossman GD. 1982. Dynamics and organization of a rocky intertidal fish assemblage: The persistence and resilience of taxocene structure. *American Naturalist* 119: 611–637.
- Gundermann N, Popper D. 1975. Some aspects of recolonization of coral rocks in Eilat (Gulf of Aqaba) by fish populations after accidental poisoning. *Marine Biology* 33: 109–117.
- Harmelin-Vivien M, et al. 1985. Evaluation visuelle des peuplements et populations de poissons: Méthodes et problèmes. *Revue d'Écologie: La Terre et la Vie* 40: 467–539.
- Jaap WC, Wheaton J. 1975. Observations on Florida reef corals treated with fish-collecting chemicals. *Florida Marine Research Publications* 10: 1–8.
- Kulbiki M. 1990. Comparisons between rotenone poisoning and visual counts for density and biomass estimates of coral reef fish populations. Pages 105–112 in *Proceedings of the 1990 Congress of the International Society for Reef Studies*; 14–18 November 1990, Noumea, New Caledonia.
- Lardner R, Ivantsoff W, Crowley LELM. 1993. Recolonization by fishes of a rocky intertidal pool following repeated defaunation. *Australian Zoologist* 29: 85–92.
- Ling N. 2003. *Rotenone—A Review of Its Toxicity and Use for Fisheries Management*. Wellington (New Zealand): Department of Conservation. Science for Conservation no. 211.
- Lockett MM. 1998. The effect of rotenone on fishes and its use as a sampling technique: A survey. *Zeitschrift für Fishkunde* 5: 13–45.
- Mahon R, Mahon SD. 1994. Structure and resilience of a tidepool fish assemblage at Barbados. *Environmental Biology of Fishes* 41: 171–190.
- Marking LL. 1992. Evaluation of toxicants for the control of carp and other nuisance fishes. *Fisheries* 17: 6–13.

- McClay W. 2000. Rotenone use in North America (1988–1997). *Fisheries* 25: 15–21.
- Planes S, Galzin R, Bablet JP, Sale PF. 2005. Stability of coral reef fish assemblages impacted by nuclear tests. *Ecology* 86: 2578–2585.
- Polivka KM, Chotkowski MA. 1998. Recolonization of experimentally defaunated tidepools by northeast Pacific intertidal fishes. *Copeia* 1998: 456–462.
- Randall JE. 2007. Reef and Shore Fishes of the Hawaiian Islands. Honolulu: University of Hawaii Sea Grant College Program.
- Roberts CD, Stewart AL. 2006. Diversity and biogeography of coastal fishes of the East Cape region of New Zealand. *Science for Conservation* 260: 1–57.
- Robertson DR, Allen GR. 2006. Shorefishes of the Tropical Eastern Pacific: An Information System, version 2.0. CD-ROM. Balboa (Panamá): Smithsonian Tropical Research Institute.
- Rosa RS, Rosa IL, Rocha LA. 1997. Diversity of the tide pool ichthyofauna from Cabo Branco Beach, João Pessoa, Paraíba, Brazil. *Revista Brasileira de Zoologia* 14: 201–212.
- Ross ST, Doherty TA. 1994. Short-term persistence and stability of barrier island fish assemblages. *Estuarine Coastal and Shelf Science* 38: 49–67.
- Sale PF. 1988. Perception, pattern, chance and the structure of reef fish communities. *Environmental Biology of Fishes* 21: 3–15.
- Schultz LP. 1948. The use of rotenone for collecting reef- and lagoon fishes at Bikini. *Copeia* 1948: 94–98.
- Singer TP, Ramsay RR. 1994. The reaction site of rotenone and ubiquinone with mitochondrial NADH dehydrogenase. *Biochimica et Biophysica Acta* 1187: 198–202.
- Smith CL. 1973. Small rotenone stations: A tool for studying coral reef fish communities. *American Museum Novitates* 2512: 1–21.
- Smith-Vaniz WF 2005. *Petroscites pylei*, a new saber-toothed blenny from the Fiji Islands (Teleostei: Blenniidae). *Zootaxa* 1046: 29–36.
- Smith-Vaniz WF, Jelks HL, Rocha LA. 2006. Relevance of cryptic fishes in biodiversity assessments: A case study at Buck Island Reef National Monument, St. Croix. *Bulletin of Marine Science* 79: 17–48.
- Thomson DA, Lehner CE. 1976. Resilience of a rocky intertidal fish community in a physically unstable environment. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 22: 1–29.
- Willis TJ. 2001. Visual census methods underestimate density and diversity of cryptic reef fishes. *Journal of Fish Biology* 59: 1408–1411.
- Willis TJ, Roberts CD. 1996. Recolonisation and recruitment of fishes to intertidal rockpools at Wellington, New Zealand. *Environmental Biology of Fishes* 47: 329–343.
- Zapata F, Robertson DR. 2006. How many shore-fish species are there in the tropical eastern Pacific? *Journal of Biogeography* 34: 38–51.

doi:10.1641/B580211

Incluye esta informacion con referencia a este material.