



TRABAJO DE GRADO
Opción Seminario-Diplomado.

Revisión sobre la quitridiomycosis en anfibios causada por *Batrachochytrium dendrobatidis*

Corporación Universitaria Remington.
Facultad de Medicina Veterinaria
Medicina Veterinaria.

Luis David Mesa Ospina
Tutor: Juan Sebastián Daza
Opción de Trabajo de grado Seminario-Diplomado.
2025.

Dedicatoria

Este trabajo lo dedico al ser que hizo posible que hoy forme mi camino como Médico Veterinario, descubriendo mi verdadera vocación y dedicación en la medicina de fauna silvestre; con ayuda de mi madre, abuelos y tío, realizamos un sacrificio mutuo durante todo el tiempo de duración de mi carrera profesional para poder dar este gran paso. En la facultad de medicina veterinaria de Uniremington debo agradecer a los docentes que me apoyaron y mostraron este mundo desde un punto de vista especial he incomprendido como es la fauna silvestre, agradezco profundamente al docente Jorge Lopera, Martha Ocampo, Mary Choperena, Víctor Quirós y Daniela Correa por mostrarme este magnífico mundo de los “bichos” y formarme en este campo emocionante y poco comprendido en la medicina veterinaria de fauna silvestre.

Tabla de contenido

Resumen.....	5
Palabras clave.....	5
Pregunta orientadora de la búsqueda	6
objetivo	¡Error! Marcador no definido.
Metodología de búsqueda de la información	8
criterios de inclusión	9
criterios de exclusión	9
Sustentación teórica de pregunta orientadora de la búsqueda	10
Generalidades del batrachochytrium dendrobatidis (bd)	11
Signos clínicos producidos por la quitridiomycosis	15
Recomendaciones	¡Error! Marcador no definido.
Discusión.....	19
Conclusiones	22
Referencias.....	23

Tabla de figuras

Figura 1.....	13
Figura 2.....	15
Figura 3.....	16
Figura 4.....	16
Figura 5.....	18

Resumen

Los anfibios se ven afectados por el hongo *Batrachochytrium dendrobatidis* (Bd), agente causal de la quitridiomycosis, la cual es una enfermedad que ha provocado una significativa disminución de anfibios en todo el mundo. Al realizar una revisión de literatura científica entre 2013 y 2024, se ha encontrado que la presencia del hongo en los anfibios representa un riesgo potencial para la sobrevivencia de estas especies. Se recopilaron datos científicos en bases de datos y revistas indexadas como PubMed, el Instituto Humboldt, Reptiles de Colombia, la Asociación Colombiana de Herpetología (ACH), BMC, Ecology and Evolution, ScienceDirect, entre otras. De conformidad con la información recolectada, el hongo puede afectar la piel de los anfibios, interrumpiendo su función y generando problemas que van desde irritaciones menores hasta la muerte por un fallo cardíaco. Factores como la fragmentación del hábitat, la contaminación y los micro plásticos hacen que los anfibios sean aún más vulnerables a la infección. Una de las conclusiones más alarmantes es que todavía no existen tratamientos efectivos contra *Batrachochytrium dendrobatidis*, lo que complicaría aún más el manejo de esta enfermedad. Por eso, este estudio devela la necesidad de desarrollar pruebas diagnósticas más precisas, tratamientos seguros y estrategias de conservación pertinentes que incluyan el trabajo en equipo de comunidades locales, instituciones académicas y gobiernos. Adicionalmente, las investigaciones futuras deben enfocarse en crear herramientas que ayuden a manejar la enfermedad y aplicar medidas de conservación que protejan no solo a los anfibios, sino también a otras especies en peligro que se encuentran en Colombia y el resto del mundo.

Palabras clave

Ranas, hiperqueratosis, hábitat, *Batrachochytrium dendrobatidis*, Anfibios

Pregunta orientadora de la búsqueda

La quitridiomycosis, causada por el hongo *Batrachochytrium dendrobatidis* (*Bd*), se ha convertido en una de las enfermedades más devastadoras para los anfibios a nivel mundial. Esta enfermedad se ha identificado como una de las principales causas de la amenaza de extinción de muchas especies de anfibios, contribuyendo de manera significativa a la actual sexta extinción masiva (Verbrugge et al., 2019). El hongo se adhiere a la piel de los anfibios, alterando su funcionamiento y provocando desequilibrios que pueden llevar a su muerte. Su rápida propagación y alta virulencia han desencadenado una crisis de biodiversidad, especialmente en regiones tropicales y subtropicales donde habita una gran diversidad de anfibios (Castro Monzon et al., 2020).

La distribución de (*Bd*) se ha reportado en lugares nuevos, como lo es en hábitat de bosque nublado y subpáramo, en altitudes que varían entre 2500 y 3200 MSNM. Inicialmente no se tenían reportes de casos encontrados en estos tipos de ambientes, generando teorías que influyen a la aparición de este patógeno a raíz de cambios en el entorno y a la introducción de especies animales no nativas de este tipo de hábitat. Además, la transformación debido a actividades humanas, como la urbanización y la construcción de carreteras, ha incrementado el riesgo de infección por *Batrachochytrium dendrobatidis* en Colombia (González & Rivera., 2013).

La falta de tratamientos eficaces contra el hongo y la rápida propagación del patógeno agravan aún más esta problemática, poniendo en peligro a los anfibios que comparten su entorno con otras especies introducidas en su hábitat, afectando la cadena ecológica de los organismos de un ecosistema (Bosch et al., 2021).

Estudiar esta situación es fundamental para la conservación de la biodiversidad en general, entendiendo los factores que afectan la vulnerabilidad de las especies de anfibios y desarrollar estrategias efectivas para mitigar el impacto de la quitridiomycosis son pasos clave para asegurar su supervivencia. Este estudio no solo brinda información valiosa sobre cómo se desarrolla la infección (*Bd*), sino que también destaca la necesidad de un enfoque colaborativo que incluya a las comunidades locales, universidades y entidades gubernamentales en la lucha contra esta enfermedad (Castro Monzon et al., 2022).

Esta información orienta la búsqueda que se pretende con este trabajo y responde a la pregunta:

¿Cuáles son los mecanismos de infección, los efectos patológicos y las implicaciones ecológicas de la quitridiomycosis causada por *Batrachochytrium dendrobatidis* en poblaciones de anfibios?

Por tal razón, el objetivo general de este trabajo fue identificar el impacto de la infección por la quitridiomycosis generada por *Batrachochytrium dendrobatidis* en las ranas, identificando los factores de vulnerabilidad y las estrategias de conservación para las especies en los hábitats naturales.

Metodología de búsqueda de la información

Se llevó a cabo una revisión bibliográfica de tipo narrativa entre el segundo semestre del año 2024 y el inicio del 2025, realizando una descripción de las temáticas abordadas en el trabajo. La revisión de la literatura científica incluyó artículos publicados entre 2013 y 2024 para entender cómo afecta la infección por *Batrachochytrium dendrobatidis* en anfibios. La información fue buscada y filtrada a partir de bases de datos como PubMed, el Instituto Humboldt, la Asociación Colombiana de Herpetología (ACH), ScienceDirect y varias revistas indexadas, como el Catálogo de Anfibios y Reptiles de Colombia, Parasites and Vectors, Scientific Reports, y BMC Ecology and Evolution, entre otras. Se realizó una búsqueda de publicaciones en idioma inglés y español mediante la utilización de palabras clave para orientar la búsqueda inicial:

- *Batrachochytrium dendrobatidis*
- Ranas
- Anfibios
- hiperqueratosis
- hábitat.

Para la estrategia de búsqueda, fueron utilizados conectores booleanos “AND” y “OR” estableciendo las siguientes ecuaciones de búsqueda para la recopilación de la literatura científica:

- Anfibios AND hábitat
- Anfibios AND *Batrachochytrium dendrobatidis*
- Anfibios AND hiperqueratosis
- Ranas AND *Batrachochytrium dendrobatidis*
- *Batrachochytrium dendrobatidis* OR hiperqueratosis
- Ranas OR Anfibios AND *Batrachochytrium dendrobatidis*

Con estas combinaciones de términos, se identificaron 207 artículos, a los cuales fueron aplicados los criterios que se refieren a continuación.

Criterios de inclusión

1. Estudios publicados entre 2013 y 2024.
2. Artículos en inglés o español que traten sobre la infección por *Batrachochytrium dendrobatidis* específicamente en anfibios
3. Investigaciones que incluyan metaanálisis, revisiones sistemáticas, estudios experimentales o descriptivos.

Criterios de Exclusión

1. Estudios que no sean científicos o que carezcan de una base metodológica clara.
2. Artículos que discutan otras enfermedades en anfibios que no estén relacionadas con *Batrachochytrium dendrobatidis*.
3. Cartas al editor, opiniones o artículos que no hayan pasado por una revisión por pares.

Sustentación teórica de pregunta orientadora de la búsqueda

La revisión bibliográfica desarrollada en los motores de búsqueda para este trabajo arrojó una cifra total de 207 artículos científicos escritos en idiomas inglés y español, de los cuales una vez aplicados los criterios de inclusión se revisaron rápidamente por título y resumen, excluyendo los artículos que no contaban con información relevante para este escrito. En consecuencia, la búsqueda realizada filtra 47 publicaciones que fueron leídas en su totalidad, excluyendo finalmente 6 artículos que no cumplían con los criterios seleccionados, contando con una base bibliográfica total de 41 artículos científicos; de esta última se seleccionan finalmente 24 artículos para el desarrollo de la revisión de tema. La selección final de los artículos y títulos se muestra en la tabla 1. Adicionalmente para citar se utilizó el software de referenciación Mendeley verificando y detectando que ninguno de los artículos estuviese duplicado.

Tabla 1. Búsqueda de información acerca la Infección por *Batrachochytrium dendrobatidis* en diferentes bases de datos.

Año de búsqueda	Idioma	Buscador utilizado	Base bibliográfica	Artículos seleccionados
2013	español	Catálogo de anfibios y reptiles de Colombia	1	1
2019	Inglés	PLoS ONE	4	1
2020	Inglés	Journal of Experimental zoology	2	1
2020	Inglés	PLoS ONE	6	1
2020	inglés	EcoHealth	2	1
2021	Inglés	ISME Journal	2	1
2021	Inglés	Molecular Ecology Resources	1	1
2021	Inglés	Parasites and Vectors	1	1
2021	Inglés	Scientific Reports	1	1
2021	Inglés	BMC Ecology and Evolution	1	1
2022	Inglés	EcoHealth	1	1
2022	Inglés	PeerJ	1	1
2022	Inglés	PluMED	1	1

2023	Ingles	Philosophical Transactions of the Royal Society B	1	1
2023	Ingles	Viruela	1	1
2023	Ingles	Oecologia	2	1
2023	Ingles	Parasites and Vectors	1	1
2023	Ingles	PeerJ	1	1
2023	Ingles	Ecological Applications	2	1
2024	Ingles	PLoS Pathogens	1	1
2024	Ingles	Proceedings of the National Academy	2	1
2024	Ingles	Oecologia	1	1
2024	Ingles	Scientific Reports	4	1
2024	Ingles	BMC Ecology and Evolution	1	1
Total			41	24

La revisión literaria realizada permitió identificar los principales enfoques terapéuticos y diagnósticos del hongo quítridio, destacando la diversidad de variaciones y la importancia de una medida preventiva para enfrentar la extinción de los anfibios a nivel mundial. Los estudios seleccionados aportan evidencia significativa sobre las necesidades de investigación futura para mejorar el manejo de esta enfermedad.

Generalidades del *Batrachochytrium dendrobatidis* (Bd)

Se ha documentado la presencia del hongo quítridio *Batrachochytrium dendrobatidis* (Bd) en todos los continentes donde habitan anfibios, abarcando un total de 119 países. En al menos 72 de ellos, se ha confirmado su carácter infeccioso, afectando aproximadamente a 695 especies. Estos registros se han asociado a cambios en factores ambientales y en las condiciones evolutivas de los anfibios, lo cual ha dado lugar a la aparición de nuevos linajes e hibridaciones del hongo. Esta evolución ha incrementado el potencial virulento del patógeno, elevando así las estadísticas de infección y afectación de especies, como ha sido evidenciado en Colombia (Castro-Monzón et al., 2020).

En 61 países, se ha muestreado y analizado un mínimo de 10 especies de anfibios, una base considerada adecuada para fines analíticos. Sin embargo, en otros países como Laos y Tanzania, la baja

representatividad de especies en los datos disponibles dificulta extraer conclusiones sólidas sobre la prevalencia y distribución de Bd (Castro-Monzón et al., 2020).

Desde un enfoque ecológico, los agentes quitridios como Bd y *Batrachochytrium salamandrivorans* (Bsal) son hongos de divergencia temprana, comúnmente presentes en ambientes acuáticos y húmedos. Estos organismos desempeñan funciones clave en el reciclaje del carbono entre niveles tróficos (Robinson et al., 2020). Su ciclo de vida se caracteriza por dos fases: una móvil y otra sésil. Comienza como una zoospora flagelada que se desplaza en el agua, y en algunas especies, este movimiento también se realiza por arrastre mediante actina en superficies. Posteriormente, la zoospora se enquistada, retrayendo su flagelo y formando una pared celular. En esta fase sésil, se desarrolla un esporangio que genera estructuras similares a hifas llamadas rizoides, las cuales permiten un crecimiento rápido. Cada esporangio libera múltiples zoosporas a través de papilas de descarga, reiniciando así el ciclo (Robinson et al., 2020).

En la piel de los anfibios se ha encontrado una comunidad microbiana con potencial función protectora frente a Bd. Estudios genómicos comparativos han identificado genes de quitinasa en aislamientos de *Agrobacterium* y *Sphingomonas*, los cuales se asocian a una posible actividad anti-Bd. Asimismo, en aislamientos de *Janthino bacterium* se encontraron variaciones en los genes responsables de la producción de violaceína. Estas diferencias genéticas podrían explicar la variabilidad en la capacidad de las comunidades bacterianas dérmicas para inhibir el crecimiento de Bd, representando una prometedora línea de defensa natural (Wax et al., 2023).

La quitridiomycosis, causada por Bd y Bsal, es una enfermedad fúngica que ha tenido un impacto sin precedentes en la actual sexta extinción masiva, provocando la muerte de millones de anfibios en el mundo. Se considera una de las infecciones más letales registradas en vertebrados (Rodríguez & Voyles, 2020). Ambos patógenos colonizan las capas queratinizadas de la piel, específicamente el estrato córneo, interfiriendo con funciones fisiológicas vitales como el intercambio de electrolitos y agua.

El amplio rango de hospedadores y la alta virulencia de estos hongos han resultado en pérdidas significativas para la biodiversidad de los anfibios, lo que posiciona a la quitridiomycosis como una amenaza crítica para la conservación global (Rodríguez & Voyles, 2020).

Factores predisponentes a la aparición del hongo

Diversos factores ambientales y biológicos han sido identificados como predisponentes para la presencia, diseminación y virulencia del hongo *Batrachochytrium dendrobatidis* (Bd) y su patógeno relacionado *Batrachochytrium salamandrivorans* (Bsal) en poblaciones de anfibios. Uno de estos factores emergentes es la contaminación por micro plásticos (Mp), partículas <5 mm de diámetro que se han convertido en contaminantes ubicuos en hábitats acuáticos, tanto dulces como marinos, y también en ambientes terrestres. Estas partículas pueden actuar como vectores pasivos al transportar zoosporas viables de Bd, representando un riesgo significativo, especialmente en las etapas larvianas de los anfibios, al aumentar la mortalidad y contribuir al declive poblacional global (Bosch et al., 2021).

Figura 1. Imagen de la rana *Hyloscirtus Antioquia*



Nota: A) Macho adulto vocalizando en bráctea de bromelia, B) hembra adulta perchada en Chusquea sp. (familia Poaceae), C) juvenil y D) renacuajo en arroyo. Fotografías: Gonzalez, L. M., & Rivera-Correa, M. (s. f.). *Hyloscirtus antioquia* Rivera-Correa y Faivovich, 2013. <https://www.researchgate.net/publication/360918220>

Además del impacto físico-ambiental, la infección por quitridiomycosis afecta directamente la inmunocompetencia del hospedador. Según (Grogan et al. 2023), el hongo compromete dos mecanismos inmunitarios esenciales en los anfibios: la resistencia, entendida como la capacidad del organismo para limitar la carga patógena, y la tolerancia, que es la capacidad de minimizar el daño fisiológico causado por la infección. La alteración de estos mecanismos puede incrementar la susceptibilidad individual y poblacional ante el hongo.

Las interacciones entre los anfibios y otros parásitos también pueden modificar la dinámica de infección. Aunque los estudios tienden a enfocarse en un solo patógeno, (Herczeg et al. 2021) advierten sobre los efectos potenciales de la coinfección con distintos genotipos de Bd u otros agentes patógenos. Estas interacciones complejas pueden exacerbar el impacto de la infección o alterar la respuesta inmune del hospedador, dificultando aún más los esfuerzos de conservación.

En este contexto, también se destaca la amenaza paralela que representa *Batrachochytrium salamandrivorans* (Bsal), el cual ha demostrado una capacidad patogénica significativa sobre diversas especies de anfibios. Actualmente, se reconocen más de 1.000 especies hospedadoras de estos hongos quitridios, considerándose la quitridiomycosis como la enfermedad con mayor impacto negativo sobre la biodiversidad de vertebrados hasta la fecha (Castro Monzón et al., 2022). La susceptibilidad del hospedador puede incrementarse durante la metamorfosis, un proceso fisiológico que implica una reestructuración profunda del sistema inmunológico, generando un punto ciego inmunitario que los hace más vulnerables al ataque del hongo (Bosch et al., 2023).

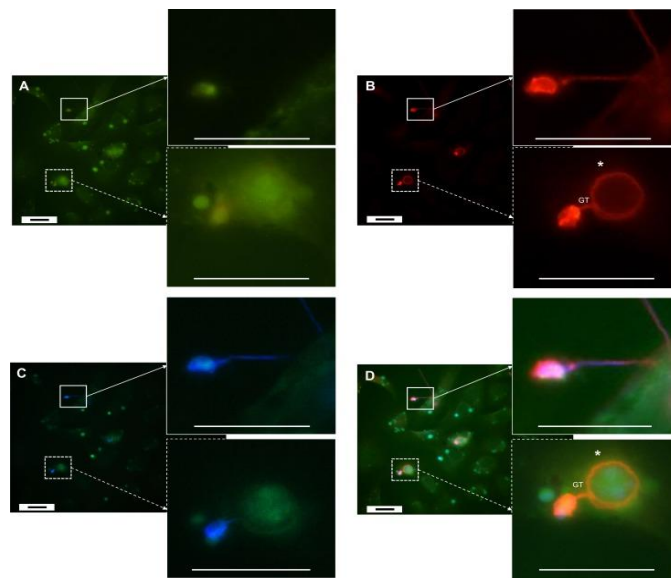
Por otra parte, se ha observado que la distribución y fisiopatología de Bd y Bsal difieren, a pesar de compartir la capacidad de infectar a los anfibios. Mientras Bd produce hiperplasia e hiperqueratosis cutánea, Bsal genera úlceras en la piel (Ruthsatz et al., 2020). Ambos afectan gravemente la homeostasis del animal, especialmente debido a las funciones multifuncionales de la piel de los anfibios, que interviene en procesos de respiración, regulación hídrica y térmica, excreción, defensa inmunitaria y reproducción. Estas funciones, junto con las interacciones tróficas, pueden ser alteradas por factores ambientales que modifican la susceptibilidad a nuevos patógenos (Wacker et al., 2024).

Un factor adicional e innovador en la dinámica de transmisión de Bd es el papel de los vectores artrópodos. Recientes investigaciones han demostrado que mosquitos hematófagos como *Culex territans*, los cuales tienen un comportamiento reproductivo y de desarrollo ligado a cuerpos de agua dulce, podrían actuar como vectores mecánicos del hongo. Se ha encontrado ADN de Bd en especies como *Corethrella spp.*, y se ha observado que *Culex territans* permanece sobre la piel de los anfibios durante aproximadamente 30 minutos para alimentarse, permitiendo así el contacto directo con la piel infectada y potencialmente facilitando la transmisión del hongo mediante la probóscide o las patas del insecto (Reinhold et al., 2023).

Signos clínicos producidos por la quitridiomycosis

En un modelo *in vitro*, se reportó que se genera una apoptosis celular A6 cuando las zoosporas son liberadas al ambiente extracelular, este fenómeno genera zoosporangios intracelulares listas para colonizar nuevas células huésped, lo que (en parte) se desvía de la situación *in vivo*. Este proceso se evidencia más en animales susceptibles, se describe la invasión mediada por el tubo germinativo, el establecimiento de talos intracelulares y la propagación de *Bd* a las capas más profundas de la piel, pero esto es seguido por una migración ascendente por células epidérmicas diferenciadoras que resulta en la liberación de las zoosporas en la superficie de la piel. Durante la quitridiomycosis inducida por *Bd*, la apoptosis ha sido reportada como un evento clave, pero el mecanismo exacto y el rol aún están por dilucidar (Verbrugge et al., 2019).

Figura 2. Crecimiento epibiótico y endobiótico de *Bd* sobre y en células A6.



Nota: aquí se identifica (A) Las células A6 expuestas a *Bd* se tiñeron utilizando un rastreador de células verde. (B) *Bd* se visualizó utilizando Alexa Fluor 568, lo que resultó en fluorescencia roja de *Bd* intracelular y extracelular (C) La pared celular de *Bd* extracelular se coloreó utilizando Calcofluor White, mostrando fluorescencia azul. Las imágenes se fusionaron en (D). Dos días después de la inoculación, se observó crecimiento epibiótico y endobiótico. El crecimiento epibiótico puede describirse como el desarrollo fuera de la célula huésped (cuadrados con una línea completa), que tiñe *Bd* tanto de azul como de rojo. El crecimiento endobiótico (cuadrados con una línea discontinua) se visualiza como una tinción roja de los talos quítridos intracelulares (*) al final del tubo germinativo (GT). Barra de escala = 20 μ m.

Figura 3. Muerte de anfibio por Bd.



Nota: forma como el hongo afecta el balance de sales y agua, además que impide la respiración a través de la piel, causando la muerte. Foto: Alessandro Catenazzi.

Las manifestaciones clínicas varían entre los dos hongos. *Batrachochytrium salamandrivorans* (Bsal) induce la formación de úlceras cutáneas, mientras que (*Bd*) causa hiperplasia epidérmica, hiperqueratosis y un aumento significativo del desprendimiento de la piel, alterando la homeostasis fisiológica del huésped y en muchos casos, llevándolo a la muerte por desequilibrio electrolítico (Verbrugghe et al., 2019).

Figura 4. Anfibio afectado por Bd



Una rana de la especie *Gastrotheca excubitor* en los Andes sufre un paro cardíaco debido a la presencia del hongo en su organismo. Foto: Emmanuele Biggi.

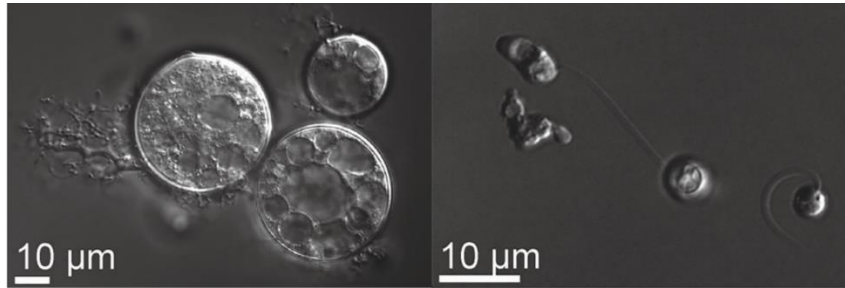
Métodos de identificación del quitridiomicosis

La detección del hongo *Batrachochytrium dendrobatidis* (Bd) en poblaciones de anfibios se ha centrado históricamente en el análisis de muestras de piel y tejidos de los huéspedes, utilizando hisopos que se frotran en zonas específicas del cuerpo. No obstante, este enfoque presenta limitaciones significativas, especialmente cuando se trabaja con especies en peligro, crípticas o con bajos niveles de actividad, lo cual dificulta la obtención de especímenes (McMahon et al., 2024). Además, se ha demostrado que Bd puede persistir en el ambiente incluso sin la presencia de huéspedes conocidos, lo que añade complejidad a su vigilancia en entornos naturales.

Frente a estas limitaciones, se han desarrollado métodos alternativos como la filtración de agua y posterior análisis molecular para la detección del ADN ambiental de Bd. Estos métodos son eficaces, pero enfrentan restricciones prácticas relacionadas con el consumo de tiempo, la disponibilidad de recursos, y la necesidad de personal con capacitación especializada (McMahon et al., 2024). Además, los modelos de distribución de especies invasoras, basados en variables climáticas y ambientales, han demostrado utilidad en la predicción de hábitats adecuados para Bd, particularmente en zonas con temperaturas cálidas, lo cual permite anticipar brotes y planificar acciones de mitigación (Rawien & Jairam-Doerga, 2022).

La aplicación de técnicas moleculares como la PCR ha permitido una detección más sensible y específica del ADN de Bd y *Batrachochytrium salamandrivorans* (Bsal), incluso en diferentes etapas del ciclo de vida del patógeno. Ensayos diseñados con cebadores y sondas específicas se han aplicado con éxito a muestras de piel, tejidos, y filtrados ambientales. Recientemente, se ha implementado la técnica de electroporación con ADN plasmídico para introducir material genético en zoosporas de Bd, optimizando así estudios de transformación genética. Sin embargo, este proceso ha requerido ajustes debido a la alta mortalidad celular observada por la intensidad de las corrientes eléctricas empleadas (Porco et al., 2024), (Kalinka et al., 2024).

Figura 5. Fase de crecimiento del hongo



Nota: Los hongos quitridios tienen un ciclo de vida bifásico caracterizado por una fase de crecimiento estacionario llamada esporangio (arriba) y una fase de dispersión móvil llamada zoospora (abajo). Imágenes tomadas a 100X utilizando microscopía de contraste de interferencia diferencial (DIC). Robinson, K. A., Dunn, M., Hussey, S. P., & Fritz-Laylin, L. K. (2020). Identification of antibiotics for use in selection of the chytrid fungi *Batrachochytrium dendrobatidis* and *Batrachochytrium salamandrivorans*. PLoS ONE, 15(10 October).

Por otro lado, el estudio de los linajes filogenéticos de Bd mediante herramientas moleculares ha sido clave para comprender su propagación y virulencia. Se han identificado seis linajes principales, siendo Bd CAPE y Bd GPL los más asociados con eventos de mortalidad masiva. Bd GPL, en particular, ha demostrado una expansión global reciente. La posibilidad de recombinación entre linajes plantea un riesgo importante, ya que podría dar lugar a variantes con mayor virulencia. No obstante, la identificación y seguimiento de estos linajes aún enfrenta obstáculos debido a la ausencia de pruebas diagnósticas específicas para cada uno, lo cual limita la vigilancia precisa de la diversidad genética de este hongo (Ghosh et al., 2021)

Recomendaciones generales

La manipulación de anfibios en contextos de investigación o conservación debe realizarse bajo protocolos estrictos de bioseguridad, ya que el contacto sin las debidas precauciones puede facilitar la transmisión de patógenos como Bd y ranavirus. Entre las medidas más recomendadas está el uso de guantes desechables nuevos para cada individuo, evitando así la transmisión cruzada entre especímenes. Sin embargo, cuando se trata de grandes cantidades de animales, este procedimiento puede generar un aumento en los costos, los residuos y el tiempo de muestreo. Además, se han reportado efectos adversos en la piel de algunos anfibios manipulados con guantes de látex, nitrilo o vinilo, lo que sugiere la necesidad de evaluar materiales menos agresivos o utilizar agentes inertes como barrera adicional (Thomas et al., 2020).

Más allá de las medidas higiénicas, las estrategias de conservación deben considerar los mecanismos inmunológicos y comportamentales que influyen en la recuperación de las poblaciones tras brotes infecciosos. Estos mecanismos incluyen la resistencia (capacidad del huésped para reducir la carga del patógeno) y la tolerancia (capacidad para minimizar el daño sin necesariamente reducir la carga). Evaluar las respuestas específicas de cada especie permite establecer qué fase del sistema inmune está siendo activada, lo que es crucial para identificar qué especies tienen mayor o menor susceptibilidad a la infección por *Bd* (Hollanders et al., 2023).

Los ecosistemas que albergan anfibios están sometidos a múltiples perturbaciones, desde cambios graduales en factores como luz y nutrientes, hasta eventos catastróficos como brotes de enfermedades emergentes. Estas enfermedades pueden alterar significativamente las comunidades ecológicas, provocando pérdidas de biodiversidad y la degradación del equilibrio natural. Es por ello, que el monitoreo ambiental constante y la implementación de medidas preventivas son esenciales para la protección de estos ecosistemas (Jani et al., 2021).

En contraste, el comercio global de anfibios con fines de mascota, medicina o alimentación se ha identificado como uno de los principales vectores de diseminación de patógenos emergentes. La propagación de enfermedades infecciosas asociadas al tráfico de ranas y otras especies sensibles representa una grave amenaza a la biodiversidad. Para contrarrestar este riesgo, se requiere una combinación de vigilancia epidemiológica, control del comercio y educación ambiental. A su vez, el uso de modelos biológicos adecuados en laboratorio permite estudiar los procesos de infección y diseñar estrategias para la preservación de especies vulnerables (Chondrelli et al., 2024).

Discusión

La extensa revisión deja claro los diversos factores ambientales y biológicos que se han identificado como un predisponente presencia y diseminación del hongo *Batrachochytrium dendrobatidis* (*Bd*) y su patógeno relacionado *Batrachochytrium salamandrivorans* (*Bsal*), estas zoosporas que pueden ser transportadas por micro plásticos y afectar a los anfibios en sus etapas larvianas aumentando su mortalidad y disminución de la población global según Bosch et al., (2021), pero en el caso de la transmisión de (*Bd*) uno de los diseminadores principales que se ha observado ligado a cuerpos de agua dulce como uno de los principales vectores que permanecen sobre la piel es el *Culex territans* que transporta mediante la probóscide o las patas del insecto el ADN y las zoosporas de (*Bd*) permitiendo

un contagio directo establecido por el investigador Reinhold et al., (2023). Teniendo en cuenta que Grogan et al. (2023) comenta que el hongo afecta directamente y compromete dos mecanismos inmunitarios fundamentales en los anfibios como lo son la resistencia y la tolerancia que dan una mejor capacidad para minimizar el daño físico causado por la infección reduciendo el mecanismo y que pueda incrementar la susceptibilidad individual y poblacional ante el hongo, en el caso de Jani et al., (2021) establece que los ecosistemas están sometidos a múltiples perturbaciones como los factores cambiantes de luz y nutrientes hasta generar eventos catastróficos como brotes de enfermedades emergentes que puedan afectar a comunidades ecológicas y pérdidas de biodiversidad donde habitan los anfibios.

Frente a todas estas limitaciones generadas de han venido desarrollando métodos alternativos para la detección del ADN en el ambiente, generando métodos más eficaces para la reducción de tiempo, disponibilidad de recursos y la necesidad de personal especializado para desarrollar la detección de (*Bd*) por el modo que McMahon et al., (2024) enfoco su investigación; en el caso de Porco et al., (2024) la investigación estableció la aplicación de una prueba de PCR que ha permitido la detección más sensible de los hongos (*Bd*) y (*Bsal*) con las muestras de ADN sin importar las etapas del ciclo de vida del patógeno y Kalinka et al., (2024) Recientemente, ha implementado la técnica de electroporación con ADN plasmídico para introducir material genético en zoosporas de *Bd*, optimizando así estudios de transformación genética debido a la alta mortalidad celular observada por la intensidad de las corrientes eléctricas empleadas en la electroporación con ADN plasmídico. Las manifestaciones clínicas que observa Verbrugghe et al., (2019) en el hongo (*Bd*) puede llegar a causar hiperplasia epidérmica, hiperqueratosis y un aumento significativo del desprendimiento de la piel alterando la homeostasis fisiológica del huésped y en muchos casos, llevándolo a la muerte por desequilibrio electrolítico mientras que Wacker et al., (2024) comenta que la (*Bd*) afecta principalmente la homeostasis de la rana causando dificultar para la respiración, no se da regulación térmica y hídrica, excreción, defensa inmunitaria y reproducción. Pueden ser alteradas por los cambios en los factores ambientales que modifican la susceptibilidad a nuevos patógenos presentes en los habitats.

Las precauciones que se deben tener en las investigaciones de conservación se deben basar principalmente en protocolos estrictos de bioseguridad al realizar un muestreo de ranas, además Thomas et al., (2020) establece que una barrera física a la hora de manipular los anfibios no facilita la transmisión de patógenos como lo es el (*Bd*), una de las barreras es la utilización de guantes y la utilización de

materiales inertes que no sean agresivos como barreras y el investigador Hollanders et al., (2023) establece que más allá de todas las medidas higiénicas se debe considerar el refuerzo inmunológico y comportamentales que ayuden la recuperaciones de un brote de (*Bd*), evaluando las respuestas específicas de cada una de las especies estableciendo que la fase del sistema inmune sea activado para establecer cuales especies son más susceptible a la infección por (*Bd*).

Conclusiones.

El manejo del hongo *Batrachochytrium dendrobatidis* (*Bd*) continúa representando un desafío significativo debido a su alta capacidad de diseminación y patogenicidad. Esta revisión evidencia la necesidad de promover investigaciones que permitan el desarrollo de pruebas diagnósticas específicas y de fácil aplicación en campo.

Las investigaciones futuras deben centrarse en el desarrollo de diagnósticos más precisos, tratamientos más seguros, efectivos y la generación de estrategias preventivas que incluyan a las diferentes instituciones involucradas, considerando la complejidad y variabilidad del patógeno, para enfrentar con éxito los desafíos que presenta la conservación de especies de anfibios que puedan ser afectadas enfatizando la necesidad de un enfoque colaborativo y multidisciplinario para enfrentar la quitridiomycosis.

La ausencia en los tratamientos eficaces y seguros para combatir el hongo (*Bd*) resalta la necesidad de implementar medidas de bioseguridad estrictas, como el uso individual de guantes por espécimen, de avanzar en alternativas terapéuticas que no afecten a otras especies del ecosistema, buscando tratamientos que no afecten negativamente a los anfibios, utilizando sustancias inertes para que su afectación sea directa y específica al hongo (*Bd*), dando resultados positivos y fundamentos sólidos para aplicar estrategias preventivas y la identificación de posibles objetivos terapéuticos.

La vigilancia epidemiológica constante, especialmente en anfibios comercializados como mascotas o con fines médicos, no cuentan con las pruebas necesarias para prevenir la dispersión del hongo. Además, es necesario un esfuerzo global y articulado, desarrollando estrategias pertinentes y aplicables de conservación, que protejan especies vulnerables para enfrentar la quitridiomycosis, requiriendo un enfoque colaborativo y multidisciplinario, apoyado en una vigilancia epidemiológica constante, especialmente en el comercio de anfibios.

Referencias

- Bielby, J., Sausor, C., Monsalve-Carcaño, C., & Bosch, J. (2022). Temperature and duration of exposure drive infection intensity with the amphibian pathogen *Batrachochytrium dendrobatidis*. *PeerJ*, *10*. <https://doi.org/10.7717/peerj.12889>
- Bosch, J., Thumsová, B., López-Rojo, N., Pérez, J., Alonso, A., Fisher, M. C., & Boyero, L. (2021). Microplastics increase susceptibility of amphibian larvae to the chytrid fungus *Batrachochytrium dendrobatidis*. *Scientific Reports*, *11*(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-01973-1>
- Bosch, J., Thumsová, B., Puschendorf, R., & Bielby, J. (2023). Drivers of *Batrachochytrium dendrobatidis* infection load, with evidence of infection tolerance in adult male toads (*Bufo spinosus*). *Oecologia*, *202*(1), 165-174. <https://doi.org/10.1007/s00442-023-05380-3>
- Carvalho, T., Si, C., Clemons, R. A., Faust, E., & James, T. Y. (2023). Amphibian *Hymenochirus boettgeri* as an experimental model for infection studies with the chytrid fungus *Batrachochytrium dendrobatidis*. *Virulence*, *14*(1). <https://doi.org/10.1080/21505594.2023.2270252>
- Castro Monzon, F., Rödel, M. O., & Jeschke, J. M. (2020). Tracking *Batrachochytrium dendrobatidis* Infection Across the Globe. *EcoHealth*, *17*(3), 270-279. <https://doi.org/10.1007/s10393-020-01504-w>
- Castro Monzon, F., Rödel, M. O., Ruland, F., Parra-Olea, G., & Jeschke, J. M. (2022). *Batrachochytrium salamandrivorans*' Amphibian Host Species and Invasion Range. *EcoHealth*, *19*(4), 475-486. <https://doi.org/10.1007/s10393-022-01620-9>
- Ghosh, P. N., Verster, R., Sewell, T. R., O'Hanlon, S. J., Brookes, L. M., Rieux, A., Garner, T. W. J., Weldon, C., & Fisher, M. C. (2021). Discriminating lineages of *Batrachochytrium dendrobatidis* using quantitative PCR. *Molecular Ecology Resources*, *21*(5), 1452-1459. <https://doi.org/10.1111/1755-0998.13299>
- Gonzalez, L. M., & Rivera-Correa, M. (s.f.). *Hyloscirtus antioquia* Rivera-Correa y Faivovich, 2013. <https://www.researchgate.net/publication/360918220>
- Grogan, L. F., Mangan, M. J., & McCallum, H. I. (2023). Amphibian infection tolerance to chytridiomycosis. En *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* (Vol. 378, Número 1882). Royal Society Publishing. <https://doi.org/10.1098/rstb.2022.0133>

Hollanders, M., Grogan, L. F., Nock, C. J., McCallum, H. I., & Newell, D. A. (2023). Recovered frog populations coexist with endemic *Batrachochytrium dendrobatidis* despite load-dependent mortality. *Ecological Applications*, 33(1). <https://doi.org/10.1002/eap.2724>

Jani, A. J., Bushell, J., Arisdakessian, C. G., Belcaid, M., Boiano, D. M., Brown, C., & Knapp, R. A. (2021). The amphibian microbiome exhibits poor resilience following pathogen-induced disturbance. *ISME Journal*, 15(6), 1628-1640. <https://doi.org/10.1038/s41396-020-00875-w>

Kalinka, E., Brody, S. M., Swafford, A. J. M., Medina, E. M., & Fritz-Laylin, L. K. (2024). Genetic transformation of the frog-killing chytrid fungus *Batrachochytrium dendrobatidis*. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 121(4). <https://doi.org/10.1073/pnas.2317928121>

McMahon, T. A., Katz, T. S., Barnett, K. M., & Hilgendorff, B. A. (2024). Centrifugation is an effective and inexpensive way to determine *Batrachochytrium dendrobatidis* quantity in water samples with low turbidity. *Oecologia*, 205(3-4), 437-443. <https://doi.org/10.1007/s00442-024-05604-0>

Porco, D., Purnomo, C. A., Glesener, L., Proess, R., Lippert, S., Jans, K., Colling, G., Schneider, S., Stassen, R., & Frantz, A. C. (2024). eDNA-based monitoring of *Batrachochytrium dendrobatidis* and *Batrachochytrium salamandrivorans* with ddPCR in Luxembourg ponds: taking signals below the Limit of Detection (LOD) into account. *BMC Ecology and Evolution*, 24(1). <https://doi.org/10.1186/s12862-023-02189-9>

Rawien, J., & Jairam-Doerga, S. (2022). Predicted *Batrachochytrium dendrobatidis* infection sites in Guyana, Suriname, and French Guiana using the species distribution model maxent. *PLoS ONE*, 17(7 July). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0270134>

Reinhold, J. M., Halbert, E., Roark, M., Smith, S. N., Stroh, K. M., Siler, C. D., McLeod, D. S., & Lahondère, C. (2023). The role of *Culex territans* mosquitoes in the transmission of *Batrachochytrium dendrobatidis* to amphibian hosts. *Parasites and Vectors*, 16(1). <https://doi.org/10.1186/s13071-023-05992-x>

Robinson, K. A., Dunn, M., Hussey, S. P., & Fritz-Laylin, L. K. (2020). Identification of antibiotics for use in selection of the chytrid fungi *Batrachochytrium dendrobatidis* and *Batrachochytrium salamandrivorans*. *PLoS ONE*, 15(10 October). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0240480>

Rodriguez, K. M., & Voyles, J. (2020). The amphibian complement system and chytridiomycosis. *En Journal of Experimental Zoology Part A: Ecological and Integrative Physiology* (Vol. 333, Número 10, pp. 706-719). John Wiley and Sons Inc. <https://doi.org/10.1002/jez.2419>

Ruthsatz, K., Lyra, M. L., Lambertini, C., Belasen, A. M., Jenkinson, T. S., da Silva Leite, D., Becker, C. G., Haddad, C. F. B., James, T. Y., Zamudio, K. R., Toledo, L. F., & Vences, M. (2020). Skin microbiome correlates with bioclimate and *Batrachochytrium dendrobatidis* infection intensity in Brazil's Atlantic Forest treefrogs. *Scientific Reports*, *10*(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-79130-3>

Thomas, V., van Rooij, P., Meerpoel, C., Stegen, G., Wauters, J., Vanhaecke, L., Martel, A., & Pasmans, F. (2020). Instant killing of pathogenic chytrid fungi by disposable nitrile gloves prevents disease transmission between amphibians. *PLoS ONE*, *15*(10 October). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0241048>

Ujszegi, J., Ludányi, K., Móricz, Á. M., Krüzselyi, D., Drahos, L., Drexler, T., Németh, M. Z., Vörös, J., Garner, T. W. J., & Hettyey, A. (2021). Exposure to *Batrachochytrium dendrobatidis* affects chemical defences in two anuran amphibians, *Rana dalmatina* and *Bufo bufo*. *BMC Ecology and Evolution*, *21*(1). <https://doi.org/10.1186/s12862-021-01867-w>

Verbrugghe, E., van Rooij, P., Favoreel, H., Martel, A., & Pasmans, F. (2019). In vitro modeling of *Batrachochytrium dendrobatidis* infection of the amphibian skin. *PLoS ONE*, *14*(11). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0225224>

Wacker, T., Helmstetter, N., Studholme, D. J., & Farrer, R. A. (2024). Genome variation in the *Batrachochytrium* pathogens of amphibians. En *PLoS Pathogens* (Vol. 20, Número 5 MAY). Public Library of Science. <https://doi.org/10.1371/journal.ppat.1012218>

Wax, N., Walke, J. B., Haak, D. C., & Belden, L. K. (2023). Comparative genomics of bacteria from amphibian skin associated with inhibition of an amphibian fungal pathogen, *Batrachochytrium dendrobatidis*. *PeerJ*, *11*. <https://doi.org/10.7717/peerj.15714>