



J. Bosch

Departamento de Biogeografía y Cambio Global, Museo Nacional de Ciencias Naturales, CSIC
 Correo electrónico: bosch@mncn.csic.es

7 Implicaciones del cambio climático en la incidencia de los hongos quitridios patógenos de anfibios

Resultados clave

- La quitridiomycosis, una enfermedad emergente específica de anfibios causada por un hongo patógeno, resulta extremadamente dependiente de la temperatura ambiental, siendo las zonas altas de montaña las más sensibles en las áreas templadas.
- En las áreas templadas la quitridiomycosis es capaz de producir mortalidades masivas de muchas especies de anfibios, declives poblacionales significativos e, incluso, extinciones locales de poblaciones.
- En áreas templadas, el incremento reciente de la temperatura en zonas altas de montaña podría estar exacerbando el desarrollo de la enfermedad, potenciando el crecimiento del hongo cuando las condiciones ambientales no permiten una respuesta inmune eficaz en los anfibios.

Contexto

El cambio climático está produciendo efectos evidentes en las relaciones entre muchos patógenos y sus hospedadores (Harvell et al. 2002). Entre otros, el aumento de las temperaturas puede suponer un incremento en las tasas de desarrollo o transmisión de los patógenos, por ejemplo minimizando las restricciones en el ciclo de vida de los patógenos durante el invierno, pero también incrementando la susceptibilidad de los hospedadores hacia los patógenos, por ejemplo, debilitando su sistema inmunológico. Durante las últimas décadas, además de los efectos derivados de cambios ambientales, los movimientos incontrolados de anfibios por parte del ser humano están provocando un desequilibrio devastador en la relación patógeno-hospedador.

La quitridiomycosis es una enfermedad emergente específica de anfibios provocada por al menos dos especies de hongos patógenos del género *Batrachochytrium* (Berger et al. 1998, Martel et al. 2013). Los hongos del género *Batrachochytrium* presentan esporas acuáticas con flagelos que se fijan al sustrato desarrollando un talo con un único zoosporangio que produce nuevas zoosporas. Dichas zoosporas se fijan a las zonas queratinizadas del cuerpo de los anfibios, que en el caso de las larvas de los anuros se limitan al disco oral. En la metamorfosis la queratina se extiende por todo el cuerpo y, con ella, la infección. Además, esta fase del desarrollo conlleva un gran coste metabólico y los individuos aún no han desarrollado los mecanismos de defensa ante patógenos que sí presentan los adultos, por lo que la mayor tasa de mortalidad se produce en estos ejemplares recién metamorfoseados.

En muchas zonas del planeta los anfibios nativos nunca habían estado en contacto con este nuevo patógeno. En otras zonas las cepas autóctonas del hongo, ya en equilibrio con sus hospedadores, están siendo reemplazadas por otras nuevas más virulentas, resultantes de procesos de recombinación genética entre las cepas endémicas y las recién llegadas por movimientos incontrolados de anfibios. La susceptibilidad de las distintas especies de anfibios ante las cepas nuevas o ante las recién llegadas es considerable, siendo la enfermedad capaz de provocar mortalidades masivas y extinciones locales en multitud de especies de anfibios de todo el mundo (p.e. Johnson 2006, McCallum 2007, Skerratt et al. 2007). Actualmente, este hongo patógeno se encuentra en todo el planeta, infectando, al menos, a más de 500 especies de anfibios (Olson et al. 2013). Además, este hongo podría ser el responsable del declive y extinción de gran parte de las cerca de 2.000 especies de anfibios que se encuentran seriamente amenazadas por causas desconocidas. Las zonas tropicales presentan la mayor

concentración de especies de anfibios del mundo y recibieron todo el protagonismo a finales de los años 90 cuando se describió el hongo patógeno. Sin embargo, es fuera de las áreas húmedas y cálidas tropicales donde se han registrado frentes epidémicos claros (Lips et al. 2008). Por otro lado, en las regiones templadas se ha constatado que las condiciones ambientales pueden modular por completo el desarrollo de la enfermedad. Así, mientras que la humedad ambiental resulta fundamental para la supervivencia del patógeno cuyas esporas no sobreviven a la desecación, la temperatura es el factor clave que gobierna su crecimiento (Longcore et al. 1999). Aunque el ciclo del patógeno se produce casi por completo dentro del hospedador, la temperatura ambiental determina completamente el desarrollo de la enfermedad dado que los anfibios no generan calor corporal y, por tanto, su temperatura corporal es próxima a la del ambiente. En laboratorio, se ha demostrado que la tolerancia térmica del patógeno es muy amplia. Mientras que las bajas temperaturas simplemente ralentizan su crecimiento, las altas temperaturas no sólo detienen su crecimiento, sino que incluso producen su muerte (las cepas tropicales presentan un crecimiento óptimo entre 17 y 28°C y consiguen sobrevivir incluso a 4°C, mientras que a 28°C detienen su crecimiento y mueren tras una semana a más de 29°C; Piotrowski et al. 2004).

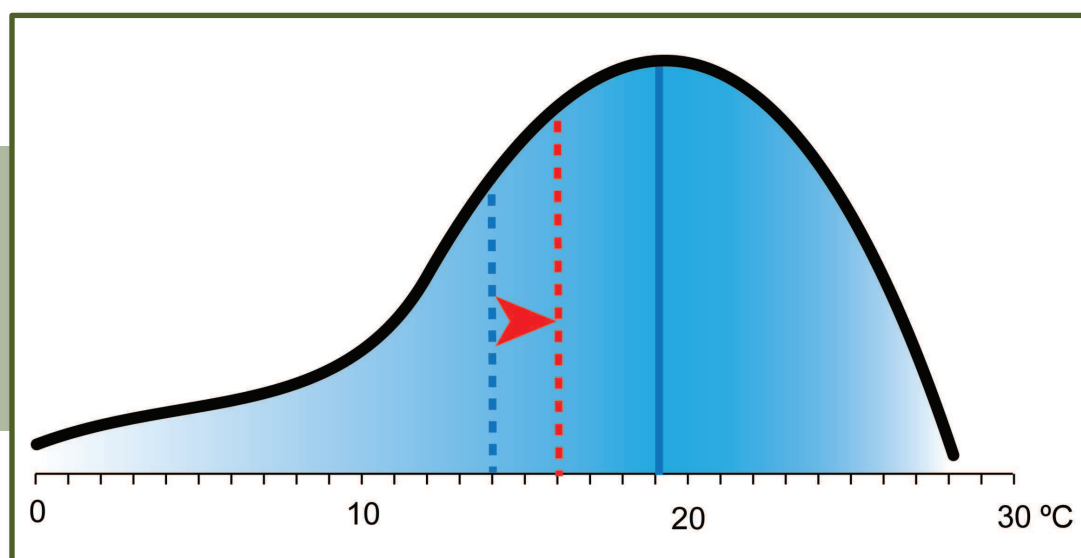
De esta forma, una visión simplista de este proceso hizo pensar a la comunidad científica que la quitridiomycosis podría ser una de las pocas enfermedades que no resultasen favorecidas por el cambio climático (p.e. Harvell et al. 2002). Sin embargo, la realidad ha resultado ser más compleja y cada vez tenemos más evidencias que demuestran que el cambio climático no sólo no está deteniendo la quitridiomycosis, sino que en condiciones particulares, como en montañas de áreas templadas, podría estar exacerbando el desarrollo de la enfermedad.

■ Resultados y Discusión

El primer caso conocido de mortalidades masivas por quitridiomycosis en Europa tuvo lugar en el Macizo de Peñalara, en el corazón del Parque Nacional de la Sierra de Guadarrama entre los años 1997 y 2003 (Bosch et al. 2001). Este episodio provocó la práctica desaparición de la población local de sapo partero común (*Alytes obstetricans*), que tradicionalmente era una de las especies más abundantes y contaba con miles de larvas en multitud de puntos de agua. Posteriormente, el sapo común (*Bufo bufo*) y la salamandra común (*Salamandra salamandra*) experimentaron también episodios de mortalidad masiva, registrando también declives poblacionales muy significativos (Bosch & Martínez-Solano 2006, Bosch et al. datos no publicados). Todas las especies afectadas ocupan charcas permanentes, poseen períodos larvarios prolongados, y, en el caso del sapo partero y la salamandra, presentan además larvas invernantes que pasan el invierno en las masas de agua bajo la cubierta de hielo.

El hongo quitridio en la península ibérica no se circunscribe al Parque Nacional de la Sierra de Guadarrama, sino que se encuentra distribuido por, prácticamente, todo su territorio. En la península ibérica se ha mostrado que la presencia del hongo no se relaciona con las condiciones ambientales, pero éstas sí condicionan la aparición de mortalidades masivas en las poblaciones de anfibios (Walker et al. 2010). Así, los episodios de mortalidad masiva sólo se han registrado en zonas por encima de los 1500 m. Esto es, zonas con bajas temperaturas y, consecuentemente, donde varias especies de anfibios presentan desarrollos larvarios prolongados. Además, la aparición de mortalidades masivas en la península ibérica claramente no se corresponde con un frente epidémico, lo que sugiere que la llegada del patógeno a estas zonas es anterior a lo estimado inicialmente, y podrían ser cambios ambientales (como la subida de la temperatura en zonas altas) los desencadenantes del desarrollo de la enfermedad.

■ **Figura 1.**



▲ **Figura 1.** Curva de crecimiento de una cepa del hongo quitridio patógeno de anfibios de las montañas ibéricas en función de la temperatura. El valor óptimo de crecimiento se indica con una línea continua. Las líneas discontinuas indican la temperatura media del agua en Peñalara antes de que comenzasen las mortalidades masivas de anfibios (en azul) y después (en rojo).

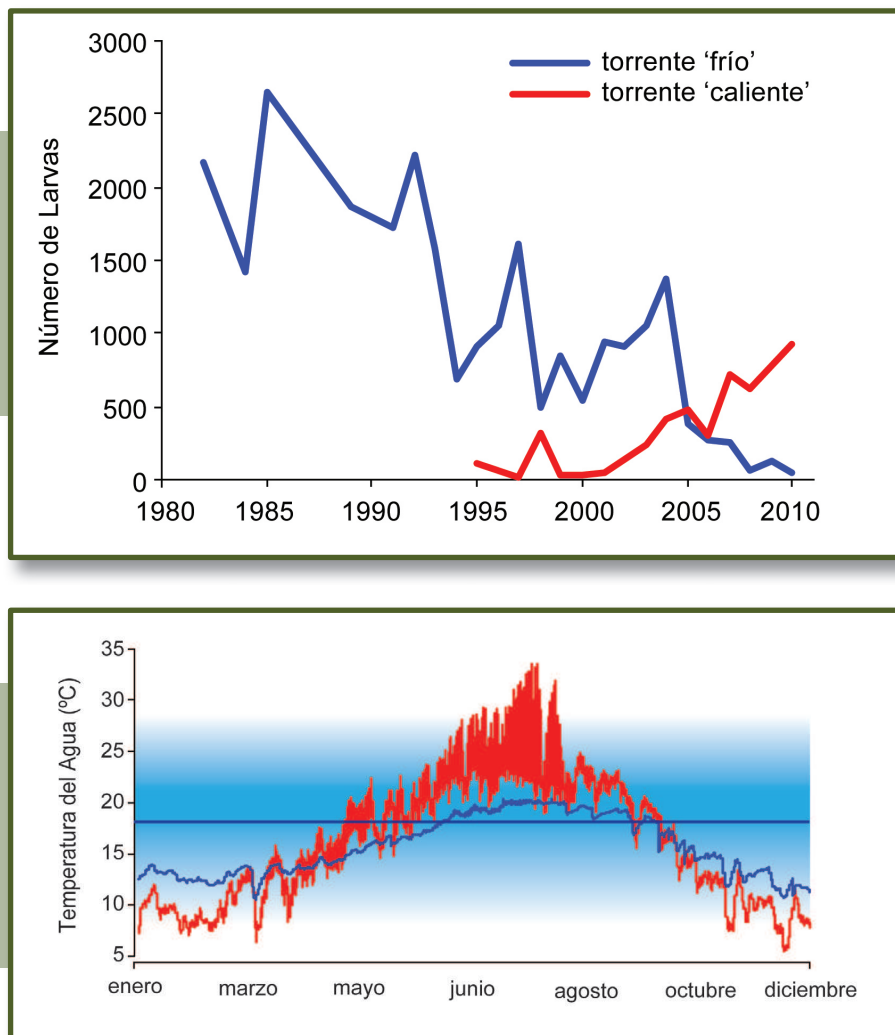
Fuente: elaboración propia.

Aunque no conocemos la fecha de introducción del hongo quitridio en el Parque Nacional de la Sierra de Guadarrama, sí sabemos con total seguridad la fecha de inicio de los episodios de mortalidad masiva acaecidos. Por lo tanto, no resultó complicado analizar si había existido un cambio significativo en las condiciones ambientales en el Parque desde la manifestación inequívoca de la enfermedad (Bosch et al. 2007). Así, el análisis de variables meteorológicas de un período anterior a 1997 y del período 1997-2003 indicó que las condiciones ambientales habían cambiado en la zona de estudio. Las anomalías climáticas producidas en la zona desde 1976 alcanzaron su valor máximo precisamente justo antes de la aparición de los brotes de la enfermedad, en 1997. Además, los cambios recogidos por las estaciones meteorológicas en superficie se correspondían con cambios ambientales en las capas altas de la atmósfera, confirmándose la relación entre los patrones de circulación global y la climatología local. Desde que empezaron las mortalidades masivas en la zona, el número de días calurosos en Guadarrama había aumentado significativamente durante el período del año en el que tiene lugar la metamorfosis de las especies

afectadas, que es justo cuando el desarrollo del hongo en los anfibios resulta letal. En concreto, el número de días en los cuales se alcanzó una temperatura coincidente con la temperatura de crecimiento óptimo del hongo en laboratorio (21-27°C) había aumentado desde el inicio de la mortalidad. Sin embargo, no encontramos diferencias significativas en la proporción de días con temperaturas demasiado bajas para el crecimiento del hongo y, en ningún caso el aumento de la temperatura había alcanzado el umbral que inhibe su crecimiento.

Todo parecía indicar que, aunque es posible que la enfermedad ya estuviese actuando en Peñalara con anterioridad a 1997, el cambio de las condiciones ambientales propició el desencadenamiento de las mortalidades masivas y, consecuentemente, el desplome poblacional (Figura 1). Sin embargo, para reforzar esta hipótesis era necesario contar con otros ejemplos en los que pequeñas diferencias en la temperatura ambiental estuviesen asociados a respuestas poblacionales distintas.

■ **Figura 2**



▲ **Figura 2.** Número de larvas de *Alytes muletensis* (1990-2010) y temperatura del agua en dos torrentes infectados con el hongo quitridio patógeno de anfibios. El rango de crecimiento del hongo patógeno en función de la temperatura aparece en color azul y la línea horizontal indica su temperatura óptima de crecimiento.

Fuente: elaborado a partir de Doddington et al. (2013).

Un ejemplo significativo lo encontramos años más tarde cuando estudiamos las tendencias demográficas de todas las poblaciones conocidas del sapo partero de Mallorca (*Alytes muletensis*), un endemismo balear. Desgraciadamente, 4 de las 35 poblaciones de esta especie que existen en la actualidad resultaron infectadas con el hongo quitridio durante el programa de reintroducción de la especie en la década de los 90, cuando aún el patógeno no había sido descrito para la ciencia (Walker et al. 2008). Todas las poblaciones de sapo partero balear libres del patógeno han incrementado su tamaño poblacional en las últimas décadas, mientras que las 4 poblaciones infectadas presentan tendencias contrapuestas (Doddington et al. 2013). Las dos poblaciones con bajos niveles de infección no presentaron una tendencia poblacional significativa, mientras que las otras dos poblaciones infectadas, situadas a escasos kilómetros una de otra, presentaron tendencias poblacionales opuestas. La población emplazada en un torrente muy abierto soporta temperaturas del agua superiores a los 33°C en verano, y se encuentra por encima de los 10°C durante más del doble de horas al año que la otra población situada en un torrente más sombrío. En ambas poblaciones la prevalencia de infección ha sido del 100% durante la estación fría de los últimos años, y en las dos hemos encontrado ejemplares muertos durante los trabajos de campo. Sin embargo, la población del torrente ‘cálido’ no ha dejado de crecer desde 1980, mientras que la población ‘fría’ está al borde del colapso, pasando de tener más de 2.500 larvas a prácticamente cero (Figura 2).

Aunque sólo contamos con registros precisos de crecimiento del hongo en función de la temperatura en cultivos de laboratorio, y no conocemos con exactitud el proceso en condiciones naturales, la temperatura parece explicar, casi por completo, el desarrollo de la enfermedad. Por consiguiente, no es sorprendente que el incremento de la temperatura esté modulando el efecto de la quitridiomycosis. El calentamiento al que están sometidas grandes áreas del planeta nunca alcanzará, probablemente, los límites que permitirían inhibir el crecimiento del hongo y, sin embargo, en zonas frescas de montañas sí podría ser suficiente para conseguir su óptimo de crecimiento.

■ Recomendaciones para la adaptación

La lucha contra la enfermedad pasa, en primer lugar, por evitar los movimientos no naturales de anfibios en las zonas que aún se encuentran libres de las cepas virulentas del hongo. Por otro lado, en las zonas afectadas las posibles soluciones que se están ensayando son de muy diversa naturaleza. De forma esperanzadora, las últimas investigaciones apuntan a que simplemente bajando los niveles de infección se pueden evitar las mortalidades masivas, y permitir así que las poblaciones afectadas sobrevivan hasta que encontremos una solución definitiva o se adquiera un cierto grado de inmunidad natural (Woodhams et al. 2011).

Dado que las temperaturas altas dificultan el desarrollo de la enfermedad, la adaptación al cambio climático podría pasar por tener presente este aspecto en los programas de creación o mejora de medios de reproducción en poblaciones amenazadas. Por ejemplo, a la hora de la creación o mejora de medios de reproducción, se debería optar por masas de agua

temporales que se sequen en verano (si lo permite la biología de las especies de anfibios en cuestión) y, en cualquier caso, favorecer la exposición del agua al sol para elevar su temperatura hasta que se superen los 20°C en verano (por ejemplo, reduciendo la profundidad de la masa de agua, orientándola al sur y evitando los objetos que pudieran producir sombra sobre el agua).

■ Material suplementario

Nuestros trabajos se desarrollan fundamentalmente en áreas de montaña de la península ibérica y las Islas Baleares. En estas zonas, las especies más sensibles a la enfermedad son el grupo de los sapos parteros (género *Alytes*), con 3 de sus 5 especies endémicas de España. Pero además, el sapo común y la salamandra común presentan un considerable grado de diversificación genética en la península ibérica y son a la vez altamente susceptibles a la quitridiomycosis. Estas dos especies, que hace años ocupaban gran parte del territorio peninsular, han sufrido un declive muy significativo en las últimas décadas por diversos problemas medioambientales bien conocidos, como la destrucción del hábitat, la pérdida de usos tradicionales del suelo o la desertificación. Por desgracia, hoy por hoy, las zonas altas de montaña constituyen un refugio fundamental para su supervivencia, pero el cambio climático está convirtiendo estos últimos santuarios en lugares más favorables al desarrollo de la quitridiomycosis.

En zonas protegidas de la Sierra de Guadarrama y la Sierra de Tramontana venimos desarrollando programas de recuperación de poblaciones amenazadas de anfibios por la quitridiomycosis desde 1999, en colaboración con las Consejerías de Medio Ambiente correspondientes. Estos programas de recuperación incluyen medidas muy diversas que van desde la cría en cautividad y el refuerzo de poblaciones en los casos más extremos, la eliminación de especies predatoras introducidas o la creación de medios alternativos de reproducción, hasta estrategias específicas destinadas a disminuir los efectos de la quitridiomycosis. Dentro de estas últimas, algunas de las posibles soluciones que estamos ensayando pasan por intentar desarrollar la inmunidad de los animales mediante el contacto con cepas atenuadas del hongo o menos virulentas, o por suministrar o favorecer el crecimiento de bacterias simbiotas que viven sobre la piel de los anfibios y que generan sustancias que inhiben el crecimiento del hongo. Sin embargo, nuestros mayores esfuerzos se están centrando en intentar disminuir los niveles de infección en poblaciones infectadas de sapo partero balear y sapo partero común mediante la desecación de los medios de reproducción y el tratamiento de los animales infectados mediante fungicidas.

Referencias bibliográficas

- Berger L, Speare R, Daszak P, Green DE, Cunningham AA, Goggin CL, Slocombe R, Ragan MA, Hyatt AD, McDonald KR, Hines HB, Lips KR, Marantelli G, Parkes H (1998) Chytridiomycosis causes amphibian mortality associated with population declines in the rain forests of Australia and Central America. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 95:9031-9036
- Bosch J, Carrascal LM, Durán L, Walker S, Fisher MC (2007) Climate change and outbreaks of amphibian chytridiomycosis in a montane area of Central Spain; is there a link? *Proceedings of the Royal Society B* 274:253-260
- Bosch J, Martínez-Solano I (2006) Chytrid fungus infection related to unusual mortalities of *Salamandra salamandra* and *Bufo bufo* in the Peñalara Natural Park (Central Spain). *Oryx* 40:84-89
- Bosch J, Martínez-Solano I, García-París M (2001) Evidence of a chytrid fungus infection involved in the decline of the common midwife toad (*Alytes obstetricans*) in protected areas of Central Spain. *Biological Conservation* 97:331-337
- Doddington BJ, Bosch J, Oliver JA, Grassly NC, García G, Benedikt RS, Garner TWJ, Fisher MC (2013) Context-dependent amphibian host population response to an invading pathogen. *Ecology* 98:1795-1804
- Harvell CD, Mitchell CE, Ward JR, Altizer S, Dobson AP, Ostfeld RS, Samuel MD (2002) Climate warming and disease risks for terrestrial and marine biota. *Science* 296:2158-2162
- Johnson PTJ (2006) Amphibian diversity: Decimation by disease. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 103: 3011-3012
- Lips KR, Diffendorfer J, Mendelson JR III, Sears MW (2008) Riding the wave: Reconciling the roles of disease and climate change in amphibian declines. *PLoS Biology* 6:e72. doi:10.1371/journal.pbio.0060072.
- Longcore JE, Pessier AP, Nichols DK (1999) *Batrachochytrium dendrobatidis* gen. et sp. nov., a chytrid pathogenic to amphibians. *Mycologia* 91:219-227
- Martel A, Spitzen-van der Sluijs A, Blooi M, Bert W, Ducatelle R, Fisher MC, Woeltjesb A, Bosman W, Chiersa K, Bossuyte F, Pasmans F (2013) *Batrachochytrium salamandrivorans* sp. nov. causes lethal chytridiomycosis in amphibians. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 110:15325-15329
- McCallum ML (2007) Amphibian decline or extinction? Current declines dwarf background extinction rate. *Journal of Herpetology* 41: 483-491
- Olson DH, Aanensen DM, Ronnenberg KL, Powell CI, Walker SF, Bielby J, Garner TWJ, Weaver G, The Bd Mapping Group, Fisher MC (2013) Mapping the Global Emergence of *Batrachochytrium dendrobatidis*, the Amphibian Chytrid Fungus. *PLoS ONE* 8: e56802. doi:10.1371/journal.pone.0056802
- Piotrowski JS, Annis SL, Longcore JE (2004) Physiology of *Batrachochytrium dendrobatidis*, a chytrid pathogen of amphibians. *Mycologia* 96:9-15
- Skerratt LF, Berger L, Speare R, Cashins S, McDonald KR, Phillott AD, Hines HB, Kenyon N (2007) Spread of chytridiomycosis has caused the rapid global decline and extinction of frogs. *EcoHealth* 4:125-134
- Walker SF, Bosch J, Gomez V, Garner TWJ, Cunningham AA, Schmeller DS, Ninyerola M, Henk D, Ginestet C, Arthur CP, Fisher MF (2010) Factors driving pathogenicity versus prevalence of amphibian panzootic chytridiomycosis in Iberia. *Ecology Letters* 13:372-382
- Walker SF, Bosch J, James TY, Litvintseva AP, Oliver JA, Piña S, García G, Rosa AG, Cunningham AA, Hole S, Griffiths R, Fisher MC (2008) Invasive pathogens threaten species recovery programs. *Current Biology* 18:R853-R854
- Woodhams DC, Bosch J, Briggs ChJ, Cashins S, Davis LR, Lauer A, Muths E, Puschendorf R, Schmidt BR, Sheafor B, Voyles J (2011) Mitigating amphibian disease: strategies to maintain wild populations. *Frontiers in Zoology* 8:8