

Cambio climático y geología. Interacciones y consecuencias a escala local y global.

Jose M^a Hernandez

Fundación Cristina Enea
Paseo Duque de Mandas nº 66, 20012 San Sebastián
E-mail: josem_hernandez@donostia.eus

Introducción

Se ha constatado una relación evidente entre la geología y el concepto de cambio climático. Así, el análisis del registro geológico ha permitido detectar cambios climáticos en épocas pretéritas, aportando información sobre su origen, magnitud, duración y su efecto en las comunidades biológicas. De hecho, esta información registrada en las rocas, sedimentos y masas de hielo sirvió de base para detectar, por comparación, el inicio del proceso de calentamiento global actual. La geología, y en concreto algunas de sus ramas como la paleoceanografía o la paloclimatología, permiten además generar modelos de evolución aplicables a las actuales dinámicas de calentamiento, permitiendo vislumbrar escenarios futuros por extrapolación de datos.

Sin embargo, la relación inversa, es decir el efecto del cambio climático en la geología, es mucho menos conocida, pese a que puede conllevar efectos adversos de muy diferente espectro. Así por ejemplo, el aumento en el nivel del mar tendrá un efecto hidrogeológico directo, ya que conllevará la penetración de masas de agua salada marina en los acuíferos costeros, poniendo en peligro el abastecimiento de agua dulce a las poblaciones humanas y a los ecosistemas. Además, adicionalmente, el aumento de la frecuencia e intensidad de las tormentas y eventos climáticos extremos producirá una mayor erosión costera, colapsando los acantilados por descalce de su base y generando graves problemas de urbanismo.

A escala global, la desaparición de grandes masas de hielo continental, sobre todo en el cono sur americano, la Antártida y las grandes cordilleras asiáticas y americanas, producirá una descompensación litostática. O dicho de otro modo, las placas tectónicas experimentarán un importante reajuste debido a la liberación, en un corto intervalo de tiempo, del peso del hielo que soportan, generándose terremotos y movimientos tectónicos en las zonas de contacto entre placas.

Por último, como consecuencia de todo lo anterior, se producirá la desaparición de áreas de notable interés geológico, con la consiguiente pérdida de geodiversidad y, por tanto, del patrimonio científico y cultural.

El Cambio Climático en el registro geológico

El registro geológico contiene abundante información y evidencias sobre la forma en la que el clima terrestre ha ido evolucionando a lo largo del tiempo geológico, lo cual es muy relevante para poder entender cómo el actual clima puede evolucionar en el futuro, ayudando en la elaboración de modelos climáticos. Así, en la actualidad, los registros paleoclimáticos están siendo ampliamente utilizados por la comunidad científica para

validar los modelos climáticos que tratan de predecir la variación climática futura Summerhayes *et al.* (2010). Los modelos paleoclimáticos pueden simular los gradientes a gran escala de las variaciones climáticas pretéritas, aunque debido a la calidad del registro geológico, pierden fiabilidad para reproducir los patrones a pequeña escala. Aun así, se ha demostrado que pueden ser una muy útil herramienta para aportar información sobre la naturaleza y magnitud de los cambios climáticos pasados, aportando un marco global donde los datos paleoclimáticos están geográficamente bien definidos.

Durante los últimos 200 millones de años, el registro fósil y sedimentario demuestra que el clima de la Tierra ha experimentado numerosas fluctuaciones, en muy diferentes escalas temporales, desde parámetros tan cálidos como los actuales hasta temperaturas medias más frías, y por supuesto, al contrario. En este segundo caso, los eventos de calentamiento han sido asociados mayoritariamente a la inyección en la atmósfera de grandes cantidades de gases de efecto invernadero, como los ocurridos hace 183, 120 y 55 millones de años, procedentes de la rápida liberación de CO₂ e hidratos de metano desde los fondos marinos (Zachos, 2008). En todos estos casos, parece que el sistema terrestre necesitó alrededor de 100,000 o más años para recuperar sus parámetros, demostrando que una liberación de CO₂ de tal magnitud puede afectar al clima terrestre durante un largo periodo de tiempo (Archer *et al.*, 2009).

El registro geológico ha puesto de manifiesto que los incrementos de gases de efecto invernadero en la atmósfera pueden estar relacionados con diferentes fenómenos o eventos, actuando como fuerzas exteriores capaces de modificar de forma brusca el sistema climático, que demuestra una gran sensibilidad a este tipo de fuerzas disruptoras. Se han mencionado variaciones orbitales a diferente escala planetaria, liberación de gases atrapados en sedimentos, aparición de especies con un metabolismo altamente productivo de dióxido de carbono, e incluso fenómenos vinculados a procesos tectónicos. La tectónica puede haber forzado cambios en las masas oceánicas, y estas a su vez en la circulación atmosférica, influenciando así la creación o evolución de regiones climáticas, si bien, su potencial para producir un amplio rango de variaciones climáticas no ha podido ser demostrado a través del registro geológico. No obstante, existe una importante excepción, y se trata del vulcanismo. La activación de volcanes, ya sean terrestres o en fondos marinos, supone la inmediata liberación de gases de efecto invernadero a la atmósfera, generando un calentamiento a escala global casi inmediato a escala geológica (Rampino y Caldeira, 1993).

A escala geográfica más cercana, hace aproximadamente 55 millones de años, a finales del Paleozoico, se produjo un rápido incremento de las temperaturas medias a escala planetaria de unos 6° C, y de entre 10 y 20° C en los polos. El carbono isotópico del registro sedimentario muestra que este evento de calentamiento, denominado en la literatura geológica como “Máximo Térmico del Paleoceno-Eoceno” (Paleocene-Eocene Thermal Maximum o PETM, en inglés), fue debido a la liberación de 1500-2000 billones de toneladas de carbono a la atmósfera procedentes de los fondos marinos, inducido probablemente por un repunte de la actividad volcánica. Los acantilados de Zumaia (Gipuzkoa) albergan una de las secciones de referencia a nivel mundial de este límite Paleoceno-Eoceno, representado por un intervalo de aproximadamente 1 - 1,5 metros de espesor de sedimentos con anomalías geoquímicas (brusca del carbonato cálcico), isotópicas (reducción de los isótopos de oxígeno e hidrógeno) y paleontológicas

(extinción masiva de foraminíferos bentónicos, reorganización de planctónicos) asociadas al PETM (Baceta *et al.*, 2000)

Efectos del cambio climático a gran escala

A la vista de la documentación científica basada en el registro geológico, parece evidente que los fenómenos geológicos han tenido un efecto de diferente magnitud en el sistema climático terrestre, favoreciendo variaciones más o menos rápidas. Sin embargo, la relación inversa también existe, es decir, la influencia de la geología en los procesos geológicos, y ha de tenerse en cuenta en los modelos teóricos que se realizan con los escenarios de futuro. Así, un aumento de las temperaturas medias a escala global, las proyecciones de modelos climáticos indican que durante el presente siglo la temperatura superficial global subirá probablemente 0,3 a 1,7 °C para su escenario de emisiones más bajas y 2,6 a 4,8 °C para los escenarios más pesimistas, tendrán como consecuencia, lo están teniendo ya, el deshielo de la criosfera y la liberación de ingentes cantidades de agua líquida a la masa oceánica. En este punto, cabe distinguir entre el hielo marino, dispuesto en las banquisas de unos 3 a 4 m de espesor y que alcanza una extensión de entre 5 y 15 millones de Km², en verano e invierno respectivamente, y el hielo continental, dispuesto sobre tierra firme.

En el primer caso, su fusión no supondría un incremento directo de nivel del mar, ya que el hielo ocupa un mayor volumen que el agua líquida. Sin embargo, la liberación del hielo continental sí conllevará importantes, y rápidos, efectos en los procesos geológicos, que además pueden realimentar el proceso de calentamiento global acelerándolo.

La Antártida está totalmente cubierta de una masa de hielo continental de 14 millones de Km² con espesores que oscilan entre 2,5 y 4 Km. La mayor masa de hielo boreal, con gran diferencia, se encuentra sobre Groenlandia con una extensión de 1,75 millones de Km² y un espesor medio de casi 2 Km. Si sumáramos el resto de glaciares y casquetes de hielo situados sobre zonas continentales obtendríamos una superficie de aproximada de 785 x 10³ Km², y un volumen estimado de 260 x 10³ Km³. Ello supondría, en caso de fusión un aporte de agua líquida a los océanos que conllevaría un ascenso estimado de 0,65 m en el caso de los glaciares y pequeños casquetes, de 7 m si se suma Groenlandia y de 70 m incluyendo el conjunto de la Antártida (Navarro, 2009).

Una liberación de tal magnitud y en un periodo de tiempo tan breve (geológicamente hablando) conllevará una modificación drástica de toda la red de drenaje asociada a cadenas montañosas, sobre todo en las regiones climáticas templadas y frías. Se modificará su trazado, régimen hídrico y periodos de intensidad, aumentando caudales en algunos lugares y cambiando el perfil hidrográfico del cauce y cuenca, y desecándolos en un rápido periodo de tiempo una vez agotado el hielo disponible. Asociado a ello, también se producirá un aumento del agua no canalizada, aumentando los flujos de escorrentía superficial con los riesgos que conllevaría en materia de hidrogeología y geología económica.

El deshielo supone también la liberación de la presión criostática, es decir el peso que ejercen las masas de hielo sobre la corteza terrestre, lo que lleva aparejado un reajuste isostático que suele conllevar un rebote. La corteza litosférica es menos densa que el

manto de forma que flota sobre él, una zona viscosa fundida, manteniendo un equilibrio isostático que resulta del balance entre el peso propio y la carga acumulada y su densidad. Este equilibrio puede verse afectado por la rápida liberación de masas de hielo, produciéndose un repentino rebote de la placa con un ascenso de materiales, que desencadenaría una serie de movimientos sísmicos de escala variable como terremotos o maremotos (Watts, 2001).

Este procesos de rebote litostático por liberación de masas de hielo continental, con el movimiento vertical de la tierra firme por efecto de una disminución de la carga de una masa de hielo, ha sido documentado, por ejemplo tras el último máximo glacial (21.000 años), y es conocido como ajuste postglacial o reelevacion postglacial (Wu *et al.*, 1999).

Efectos del cambio climático a escala local

Según el Informe Especial sobre Escenarios de Emisiones del IPCC, una de las principales consecuencias del cambio climático es el incremento del nivel del mar que, si bien de manera no uniforme en todo el mundo, podría alcanzar para mediados del decenio de 2090 entre 0,22 y 0,44 metros por encima de los niveles de 1990. Como efecto inmediato, se produciría desde problemas concretos de urbanismo y abastecimiento de agua potable, hasta la desaparición de ecosistemas biológicos completos y la generación de cataclismos a escala regional.

A escala local, según los “Escenarios proyectados de cambio climático en el País Vasco”, elaborados por el Departamento de Medio Ambiente y Política Territorial del Gobierno Vasco (noviembre de 2015), para finales del siglo XXI. se espera que la temperatura del mar en la costa vasca aumente de 1,5 a 2,05° C en los primeros 100 metros de profundidad, con ascensos medios del nivel del mar entre 19 y 49 cm. Este ascenso aumenta el riesgo de inundación en zonas urbanas costeras y portuarias, y en Gipuzkoa, el área total afectada por el ascenso del nivel medio del mar se estima en 110 hectáreas. Puertos como el de Ondarroa, Deba y Zumaia se encuentran a una altura de menos de 30 cm sobre la pleamar máxima prevista para finales de siglo, por lo que las estimaciones determinan que estos puertos serían fácilmente rebasables. Las playas y arenales constituyen uno de los elementos más vulnerables al ascenso del nivel del mar, que provocará un retroceso del 25% al 40% de su anchura. Las playas de Zarautz y Getaria (Gipuzkoa) se verán muy afectadas para su uso turístico, ya que perderían su ya escasa superficie de arena seca durante la pleamar, y en el caso de la playa de Laida (Reserva de Urdaibai, Bizkaia) el retroceso puede alcanzar 47 metros.

Así pues, este ascenso del nivel del mar tendrá como primer impacto la pérdida de masa emergida en las zonas costeras, con una alteración directa sobre la dinámica sedimentaria costera, alterando los medios sedimentarios de acumulación y distribución de arena y reconfigurando el balance entre el depósito y la subsidencia de sedimentos. Sin embargo, la inundación de amplias áreas tendrá también incidencia en el dominio hidrogeológico, produciéndose la intrusión de masas de agua salada o salobre en los acuíferos costeros, que en ocasiones sirven de abastecimiento de las poblaciones cercanas. Los acuíferos costeros son el nexo de unión entre las masas oceánicas y los sistemas hídricos continentales, y se estima que abastecen de agua dulce a una

población superior a un billón de personas residentes en las regiones costeras (Post, 2005). El equilibrio agua dulce/agua salada es siempre muy frágil a causa de la elevada capacidad de mezcla entre las dos y depende de la relación entre el volumen de recarga y descarga. Diferentes estudios y modelos predictivos indican que el ascenso del nivel del mar llevará aparejada una intrusión de agua salada en los acuíferos costeros, siendo los acuíferos con menor gradiente hidráulico los más vulnerables (Loáiciga, 2012).

Es más, un incremento en la frecuencia de los eventos tormentosos, aparejados al cambio climático, conllevará la inundación recurrente de más amplias zonas alejadas de la costa, con la posibilidad de una infiltración vertical de agua salina marina en acuíferos más interiores (Yu, 2010). Este proceso supondrá un incremento de la salobrización y salinización de las aguas dulces inicialmente producida por la intrusión lateral de aguas marinas ligadas al ascenso del nivel del mar.

Gipuzkoa posee una superficie de 1.980 Km², muy abrupta y montañosa que se estructura mediante valles paralelos de dirección aproximadamente N-S que recogen toda la red hidrográfica que se genera desde la divisoria de aguas Cantábrico-Mediterránea y que desembocan en el mar Cantábrico. La densidad poblacional no es homogénea sino que tiene una fuerte tendencia a concentrarse cerca de la costa, y particularmente en la zona oriental comprendida entre Zumaia e Irún (60% de la población de Gipuzkoa está a menos de 6 Km de la línea de costa). De acuerdo con el Informe "Bases para la elaboración de las directrices sobre el uso sostenible del agua en Gipuzkoa" elaborado por la Diputación Foral de Gipuzkoa (2006), la Unidad Hidrogeológica Jaizkibel, que ocupa la franja cercana a la costa entre Zumaia e Irún con una superficie de 25 Km², es un acuífero detrítico mixto constituido principalmente por materiales detríticos terciarios con permeabilidad por porosidad intergranular, junto con procesos de fracturación y karstificación, con caudales de explotación del 13,8 hm³. Este gran acuífero, junto con las unidades aluviales cuaternarias asociadas a los grandes ríos (Bidasoa y Urumea, principalmente), que aunque en general presentan una extensión muy limitada y una potencia no superior a 20 m, son los que mayor afección sufrirán por los procesos de intrusión marina lateral ligada al ascenso del nivel de mar, y de percolación vertical debido al incremento de los fenómenos tormentosos.

El aumento en la concentración de los gases de efecto invernadero, vinculados al cambio climático, es la causa de cambios regionales y globales en la temperatura, precipitación y otras variables climáticas, lo cual conlleva a cambios globales con la ocurrencia más frecuente y severa de eventos extremos como huracanes, frentes fríos, y eventos tormentosos extremos (Santiago-Lastra, *et al.*, 2008). Estos fenómenos, denominados eventos tormentosos extremos, se caracterizan por su intensidad, mayor frecuencia y virulencia, y los modelos predictivos indican que podrán llegar a duplicarse en este siglo. Como consecuencia, se producirá un incremento del oleaje, de su energía y de su frecuencia. El oleaje es uno de los mayores factores modeladores de nuestra costa en diferentes escalas. En el marco del proyecto realizado por la Universidad de Cantabria para la Oficina Española del Cambio Climático y la Dirección General de Costas del Ministerio del Medio Ambiente (Medina *et al.*, 2004), se ha realizado un estudio de reanálisis de 44 años de datos (1958-2001) obtenidos mediante simulación numérica en el que se ha considerado variables meteorológicas y oceanográficas relevantes para evaluar los posibles efectos del cambio climático en la costa, incluyendo estudiado también el régimen extremal. El estudio refleja que se puede observar un aumento de la

energía del oleaje que llega a la Costa Cantábrica. La dirección predominante del oleaje tiende a ser más del Oeste con mayor intensidad en la costa occidental. La energía del oleaje tiende a aumentar. Los resultados de variación a largo plazo indican que se ha producido un incremento de los temporales en el Norte que además ha conllevado la variación en el ángulo del flujo medio de energía contribuyendo a un proceso de retroceso adicional al de la sobrelevación del nivel del mar (Cendrero *et al.*, 2004).

En la costa País Vasco, en el caso de los acantilados incluso los de tipo “blando”, se han identificado un total de 9 Km de acantilados con tasas de erosión que se verían incrementadas por el incremento de eventos tormentosos extremos con una aceleración de las tasas de retroceso hasta valores de metros por año (Rivas y Cendrero, 1995). El colapso por el descalce de estos acantilados costeros batidos por eventos extremos, conllevaría un retroceso de la línea de costa en zonas topográficamente más altas en las que el ascenso del nivel del mar, en principio, tendría un menor efecto, reconfigurando la geomorfología local, y generando problemas graves de urbanismo en la zona de Gipuzkoa.

Efectos del cambio climático en la geodiversidad

En general, los impactos del cambio climático sobre la biodiversidad han sido abordados por numerosos estudios a diferentes escalas. Sin embargo, los estudios sobre el efecto del calentamiento global tendrá sobre la geodiversidad y el patrimonio geológico son más infrecuentes (Gordon *et al.*, 2012). De acuerdo con Prosser *et al.* (2010) la geodiversidad debe comprenderse como una parte integral del entorno natural, que comprende y sustenta los ecosistemas, de ahí la importancia de su conservación. La geodiversidad no contribuye solo al incremento del patrimonio de una comunidad, aportando material para el desarrollo de investigaciones y el progreso del conocimiento y la ciencia, sino que además puede ser considerado como un motor socio-económico local al proveer de servicios vinculados con la presencia de grupos de investigación e incluso de turismo geológico. Por tanto, la inundación de las áreas costeras por el ascenso del nivel del mar y la erosión de acantilados por el incremento del oleaje asociado a eventos extremos, puede conllevar la pérdida de puntos o zonas de interés geológico.

En los “Escenarios proyectados de cambio climático en el País Vasco” para finales del siglo XXI. los ascensos medios del nivel del mar se sitúan entre 19 y 49 cm, lo cual supondría que se verían afectados a diferente escala 17 de los 37 Lugares de Interés Geológico situados en Gipuzkoa por el Inventario de 2015 del Gobierno Vasco, siendo especialmente sensibles el Flysch arenoso del Cretácico superior de Deba-Zumaia (LIG 28), Límite K/T en Zumaia (LIG 43), Paleoceno y GSSPs de Zumaia (LIG 45), Límite P/E en Zumaia (LIG 48), Bahía de Donostia (LIG 89), Conjunto geomorfológico de la rasa de Sakoneta (LIG 101), Conjunto geomorfológico de la playa de Itzurun (LIG 103), Formas de erosión de Labetxu (Jaizkibel) (LIG 115), Icnofósiles del flysch eoceno de Zumaia-Getaria (LIG 135) y Seudo-paramoudras de Jaizkibel (LIG 136). La pérdida de todos estos lugares o áreas de interés geológico tendría un impacto muy negativo no solo por la desaparición de aspectos relacionados con el interés científico, la estética, la didáctica y la conservación del recurso geológico, sino también por la desaparición de un incuestionable potencial geoturístico.

Conclusiones

El registro geológico aporta relevante información sobre la dinámica climática terrestre en épocas pretéritas, y por lo tanto puede contribuir a mejorar los modelos predictivos sobre la evolución climática ante el escenario de cambio climático. Sin embargo, la interacción que el calentamiento global tendrá en los procesos geológicos actuales está menos documentada y existen pocas contribuciones en este sentido. Sin embargo, los efectos serán notorios, tanto a escala global, como local. La fusión de las masas de hielo continental reconfigurarán las redes de drenaje, los procesos sedimentarios asociados y por tanto la geomorfología y paisaje, y provocarán un rebote litostático en una muy breve escala de tiempo geológico al liberarse de la presión que ejercía el hielo. A escala local, un ascenso del nivel del mar conllevará la penetración de masas de agua salada en los acuíferos costeros, modificando notablemente la hidrogeología local, y el aumento de la frecuencia e intensidad de los eventos tormentosos extremos, y del oleaje, producirá un retroceso de los acantilados costeros por descalce y colapso. De forma complementaria, la desaparición de amplias zonas costeras por los efectos antes indicados, llevará aparejado la potencial pérdida del patrimonio geológico y geoturístico.

Referencias bibliográficas

Archer, D. et al. (2009) Atmospheric Lifetime of Fossil Fuel Carbon Dioxide. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 37, 117-134 p.

Baceta, J.I., Pujalte, V., Dinares-Turrell, J., Payros, A., Orue-Etxebarria, X. y Bernaola, G. (2000) The Palaeocene/Eocene boundary interval in the Zumaia Section (Gipuzkoa, Basque Basin): magnetostratigraphy and high-resolution lithostratigraphy. *Rev. Soc. Geol. Esp.* 13, 375–391 p.

Cendrero A., Rivas V. y Remondo J. (2004). Influencia humana sobre los procesos geológicos superficiales; consecuencias ambientales. En: Naredo J.M. (ed.). *Incidencia de la especie humana sobre la Tierra. Colección Economía y Naturaleza Fundación César Manrique Lanzarote.*

Gordon, J.E., Barron, H.F., Hansom, J.D. y Thomas, M.F. (2012) Engaging with geodiversity—why it matters. *Proceedings of the Geologists' Association*, 123 (1), 1-6 p.

Loáiciga, H.A., Pingel, T.J. y Garcia, E.S. (2012). Sea water intrusion by sea-level rise: Scenarios for the 21st century. *Ground Wat.* 50, 37–47 p.

Medina R., Losada I.J., Méndez F.J., Olabarrieta M., Liste M., Menéndez M., Tomás A., Abascal A.J., Agudelo P., Guanche R. y Luceño A. (2004) *Impacto en la Costa Española por Efecto del Cambio Climático. Oficina Española de Cambio Climático –Dirección General de Costas (Ministerio de Medio Ambiente).*

Navarro, F. (2009) *Criosfera y cambio climático: introducción y técnicas. Evolución y dinámica del hielo.* En: *Cambio climático y sociedad* (Ed. Flores, J.A). Universidad Internacional de Andalucía. 26-37 p.

Post, V.E.A. (2005) Fresh and saline groundwater interaction in coastal aquifers: Is our technology ready for the problems ahead? *Hydrogeol. J.* 13, 120–123 p.

Prosser, C. D., Burek, C. V., Evans, D. H., Gordon, J. E., Kirkbride, V. B., Rennie, A. F. y Walmsley, C. A. 2010. Conserving geodiversity sites in a changing climate: management challenges and responses. *Geoheritage*, 2: 123–136 p.

Rampino, M.R., y Caldeira, K. (1993) Major episodes of geologic change: Correlations, time structure and possible causes. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 114, 215–227 p.

Rivas V. y Cendrero A. (1995) Human influence in a low-hazard coastal area: an approach to risk assessment and proposal of mitigation strategies. *Coastal Hazards. Perception Susceptibility and Mitigation. Journal of Coastal Research* 12: 289-298 p.

Summerhayes, C., Cann, J., Cohen, A., Francis, J., Larter, R., Lowe, J., McCave, N. Haywood, A. Pearson, y P., Wolff, E. (2010). Climate change: evidence from the geological record (2010) A statement from the Geological Society of London. 12 p.

Santiago-Lastra, J.A., López-Carmona; M. y López-Mendoza, S. (2008) tendencias del cambio climático global y los eventos extremos asociados. *Ra Ximhai* 4 (3): 625-633 p.

Watts, A.B. (2001) *Isostasy and flexure of the Lithosphere*. Cambridge University Press, New York.

Wu, P., Johnston, P. y Lambeck, K. (1999) Postglacial rebound and fault instability in Fennoscandia. *Geophys. J. Int.* (1999) 139, 657–670 p.

Yu, W. (2010) Implications of climate change for fresh groundwater resources in coastal aquifers in Bangladesh. Document of the World Bank. 58 p.

Zachos, J.C., Dickens, G.R. y Zeebe, R.E. (2008) An early Cenozoic perspective on greenhouse warming and carbon-cycle dynamics. *Nature* 451, 279-283 p.