

# EVOLUCIÓN DEL PROCESO DE FOTOSÍNTESIS DESPUÉS DEL IMPACTO DEL ASTEROIDE DE CHICXULUB.

PHOTOSYNETIC PROCESS EVOLUTION AFTER THE IMPACT OF THE CHICXULUB ASTEROID

N. PÉREZ-DÍAZ<sup>at</sup>, O. MARTÍN-GONZÁLEZ<sup>a</sup> Y R. CÁRDENAS-ORTIZ<sup>a</sup>

a) Grupo de Ciencia Planetaria, Departamento de Física, Facultad Matemática Física y Computación, Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas. noelpd@uclv.edu.cu†

† autor para la correspondencia.

Palabras clave: Aerosols, 92.30.Ef; Asteroids, 96.30.Ys; Impact phenomena, 96.12.ke; Photosynthesis, 92.20.ch; Ultraviolet Radiation; 87.50.W-

El impacto del asteroide de Chicxulub (Yucatán, México), ocurrido hace unos 65 millones de años cerca del límite Cretácico-Paleógeno (K/Pg), ocasionó un brusco cambio climático global y con ello una extinción masiva de vida [1]. La energía cinética del asteroide al impactar, del orden de  $10^{24} - 10^{25}$  J, provocó terremotos de categoría 10 en toda la cuenca del Caribe y tsunamis cuyas huellas se aprecian incluso en nuestro país. La evaporación de la roca blanca y la del asteroide inyectó en la estratosfera media y alta gran cantidad de gases del azufre que fueron convertidos en aerosoles del azufre por oxidación. Los mismos redujeron la energía solar que llegaba a la superficie terrestre, conduciendo a un escenario conocido como de "frío y oscuridad". Además, se formaron cantidades enormes de óxidos de nitrógeno y cloro, catalizando la destrucción del ozono atmosférico [2]. Para el impacto de Chicxulub se estimó la inyección de una cantidad de cloro suficiente como para destruir el 80% de la capa de ozono [3]. La destrucción del ozono estratosférico permite el incremento de la radiación ultravioleta (UV) en la superficie terrestre, fundamentalmente del UV-B (280-315 nm), nociva para los organismos vivos. A un incremento de la radiación ultravioleta por la disminución del ozono se opone una reducción por los aerosoles. Mientras los aerosoles ensanchan la absorción de la radiación UV en la estratosfera, la reducción del ozono la disminuye. Estas perturbaciones atmosféricas influyeron notablemente en la evolución del proceso de fotosíntesis después del impacto, atendiendo fundamentalmente a la dinámica de los aerosoles y el ozono.

En este trabajo mostramos la evolución de la atmósfera posterior al impacto de Chicxulub, y como la fotosíntesis del fitoplancton fue afectada. Nuestra atmósfera modelo considera la presencia de aerosoles de azufre y una capa de ozono reducida. Los aerosoles del azufre presentes tienen un 80% de  $\text{SO}_2$  y 20% de  $\text{SO}_3$  [4]. El contenido de ambos; en distintos

momentos después del impacto, cambia en la medida que se recupera la atmósfera [5]. Se usó una clasificación óptica de las aguas oceánicas para modelar el transporte radiativo oceánico y el consecuente efecto sobre el fitoplancton [6,7].

El estimado del flujo UV en la superficie del mar para diferentes ángulos zenitales, se llevó a cabo usando el software TUV Radiative Transfer Model, que permite cambiar diversos parámetros de la atmósfera bajo estudio.

Las irradiancias espectrales  $E(\lambda, z)$  a la profundidad  $z$  en la columna de agua oceánica fueron estimadas usando la ley de Lambert-Beer:

$$E(\lambda, z) = E(\lambda, 0^-) \cdot \exp[-K(\lambda) \cdot z] \quad (1)$$

$K(\lambda)$  es el coeficiente de atenuación,  $E(\lambda, 0^-)$  es la irradiancia espectral inmediatamente debajo de la superficie del mar calculada sustrayendo la irradiancia reflejada de la incidente  $E(\lambda, 0^+)$ .

$$E(\lambda, 0^-) = [1 - R] \cdot E(\lambda, 0^+) \quad (2)$$

Siendo  $R$  el coeficiente de reflexión estimado con las fórmulas de Fresnel aplicadas a la interfase aire-agua.

La irradiancia total EPAR ( $\lambda, z$ ) a la profundidad  $z$  en el océano para la radiación fotosintéticamente activa (PAR) es estimada por la expresión Esiguiente:

$$E_{PAR}(z) = \sum_{\lambda_i}^{\lambda_f} E(\lambda) \cdot \Delta\lambda \quad (3)$$

Con  $\lambda_i=400$  nm y  $\lambda_f=700$  nm los extremos de la PAR y  $\Delta\lambda$  es el tamaño del intervalo de longitudes de onda para la cual  $K(\lambda)$  es medido. En nuestro caso  $\Delta\lambda=1$  nm, [8].

Para el caso de la irradiancia UV inhibitoria fue estimada considerando el espectro de acción biológica  $\epsilon(\lambda)$  el cual pesa el efecto de cada longitud de onda de esta banda.

$$E_{UV}^*(z) = \sum_{\lambda_i}^{\lambda_f} E(\lambda, z) \Delta\lambda \quad (4)$$

Donde el término de la izquierda es la irradiancia biológicamente efectiva que considera el espectro de acción biológica.

Finalmente para contabilizar las tasas de fotosíntesis  $P$  a la profundidad  $z$  en el océano (normalizada respecto a la tasa  $P_S$ ) usamos un modelo para fotosíntesis (E-model) para fitoplancton con buenas capacidades de reparación del daño UV [9].

$$\frac{P}{P_S}(z) = \frac{1 - \exp(-E_{PAR} / E_S)}{1 + E_{UV}^*} \quad (5)$$

Indicando  $E_S$  la eficiencia de la especie en el uso de la radiación fotosintéticamente activa, inversamente proporcional al rendimiento cuántico de la fotosíntesis. Mientras más pequeño es  $E_S$ , mayor es la eficiencia.

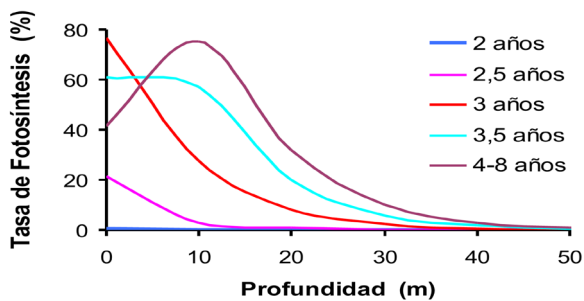


Figura 1: Tasas de fotosíntesis para aguas tipo III, ángulo zenital solar de  $0^\circ$  y parámetro de eficiencia  $E_S = 25 \text{ W/m}^2$ .

La figura 1 muestra el comportamiento de la tasa de fotosíntesis en diversos momentos después del impacto. Durante los dos primeros años la fotosíntesis fue bloqueada debido a la presencia de alto contenido de aerosoles en la atmósfera. Entre los 2.5 y 3 años la concentración de aerosoles es todavía relativamente alta por lo cual las tasas de fotosíntesis máximas se localizan cerca de la superficie del mar. A partir de los 4 años las tasas de fotosíntesis en la columna de agua oceánica muestran un comportamiento similar pues el contenido de aerosoles ha disminuido notablemente. Aunque el ozono se encuentra deprimido limitadamente (en recuperación), el agua oceánica actúa como un escudo protector de la nociva radiación UV, por lo que la tasa máxima se desplaza a mayor profundidad que en los años precedentes.

La zona fótica disminuye su espesor dependiendo del tipo de agua. Así en las aguas tipo I (mas claras) llega a los 200 m, las tipo II (intermedias) los 80 m y las tipo III alcanza solo los 50 m.

Hasta los 2.5 años después del impacto la productividad primaria es muy baja: la presencia de grandes cantidades de aerosoles impide o reduce drásticamente la radiación que llega a la superficie del océano. En el período de 2.5-4 años hay un incremento de la productividad primaria, asociado a la disminución de la concentración de aerosoles. Entre los 4 y 8 años la productividad primaria se estabiliza por las mismas causas que son similares las tasas de fotosíntesis analizadas (Figura 2).

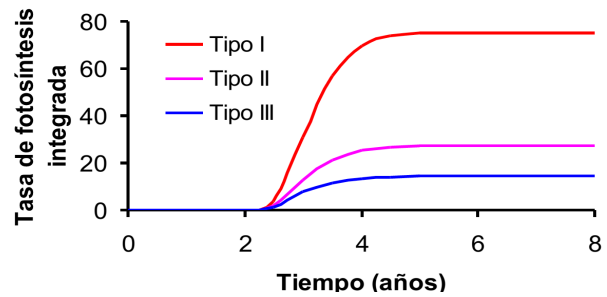


Figura 2: Tasas de fotosíntesis integradas para ángulo zenital solar de  $0^\circ$  y parámetro de eficiencia  $E_S = 25 \text{ W/m}^2$ .

La productividad primaria varía sustancialmente acorde a la eficiencia de la especie: los organismos menos eficientes son más inertes a los cambios en el tiempo que los más eficientes. Además, en las latitudes bajas la productividad primaria es mayor que en las altas, pues en las primeras la cantidad de radiación llegada a la superficie oceánica es mayor que en las segundas.

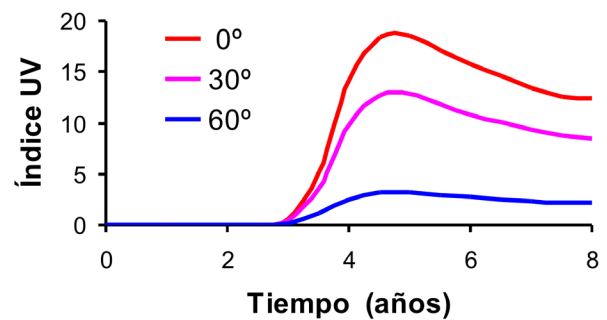


Figura 3: Índice UV en superficie oceánica en diferentes momentos después del impacto del asteroide para diferentes latitudes.

Los indicadores de daño biológico (daño al ADN, índice UV y peso del UV-B) en la superficie oceánica estimados mostraron sus máximos valores entre los 4.5 y 5 años después del impacto del asteroide, debido al efecto conjunto de un bajo nivel de aerosoles ( $\sim 2.83-0.92 \text{ DU}$ ) y recuperación de la capa de ozono limitada ( $\sim 66.7\%$  de  $\text{O}_3$  respecto al nivel normal). El daño producido por la radiación UV es mayor en las bajas latitudes (mayor incidencia de radiación) que en las altas (Figura 3). El daño biológico está más controlado por la dinámica del ozono que por el nivel de aerosol en la atmósfera.

La productividad primaria post-impacto, durante el momento de mayor daño biológico en la superficie del océano, es mayor

que durante el crudo régimen radiacional del eón Arcaico (entre 3800 y 2500 millones de años atrás, cuando no existía capa de ozono). Esto se observa en la Figura 4.

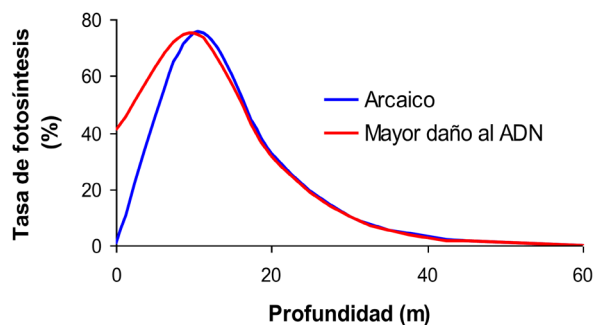


Figura 4: Tasas de fotosíntesis para escenarios Arcaico (azul) y post-impacto (rojo), con ángulo zenital solar de  $0^\circ$ , aguas tipo III y parámetro de eficiencia  $E_s = 25 \text{ W/m}^2$ .

En los primeros años la mayor influencia en la fotosíntesis es la oscuridad controlada por la presencia de los aerosoles, siendo el peor escenario durante los dos primeros años cuando se alcanzan los valores más altos. Al alcanzar la luz la superficie terrestre; el mayor efecto en el proceso de fotosíntesis así como en los indicadores de daño biológico, es regido fundamentalmente por la dinámica del ozono. La productividad del fitoplancton varió durante este proceso en función de los aerosoles y la columna de ozono, siendo esta dependencia menos sensible para las aguas de tipo II y III que la I. La recuperación comienza en las latitudes bajas para luego extenderse a las altas. La atmósfera en el momento de mayor daño al ADN después del impacto tiene mejores condiciones para albergar a los organismos fotosintéticos que durante el eón Arcaico.

[1] L.W. Alvarez, W. Alvarez, F. Asaro y H.V. Michel "Extraterrestrial cause for the Cretaceous-Tertiary extinction", *Science* 208, 1095 (1980).

[2] X. Tie and G. Brasseur "The response of stratospheric ozone volcanic eruptions: Sensivity to atmospheric chlorine loading", *Geophys. Res. Lett.*, 22, 3035 (1995).

[3] D. A. Kring "Ozone-depleting Cl and Br produced by the Chicxulub impact event", *Meteorit. Planet. Sci.*, 34, A67-A68 (1999).

[4] E. Pierazzo, A.N. Hahman and L.C. Sloan "Chicxulub and Climate: Radiative Perturbations of Impact-Produced S-Bearing Gases", *Astrobiology*, 1, 99 (2003).

[5] H. Ishida, K. Kaiho and S. Asano "Effects of a large asteroid impact on ultra-violet radiation in atmosphere", *Geophys. Res. Lett.*, 4:23 (2007).

[6] N. Jerlov "Applied Optics", Elsevier, Amsterdam, 2004.

[7] K. Shifrin "Physical Optics of Ocean Water", American Institute of Physics, New York, 1988.

[8] N. Perez, R. Cardenas, O. Martín and R. Rojas "Modelling onset of photosynthesis after Chicxulub asteroid impact", *Astrophys. Sp. Sc.*, 343 (2013).

[9] J. Fritz, P. Neale and J. Pelloquin "Response of Antarctic phytoplankton to solar UVR exposure: inhibition and recovery of photosynthesis in coastal and pelagic assembles", *Mar Ecol. Prog. Ser.*, 365:1 (2008)