RESPIRACIÓN DEL SUELO EN EL YUNQUE

Información de Trasfondo

El elemento de la vida

El **Carbono (C)** está en todos lados. Este elemento químico es fundamental para la vida en la Tierra (Figura 1)[1]. El carbono puede combinarse con una gran variedad de elementos para crear diferentes moléculas estables, lo que ha hecho del carbono un componente común de las moléculas en la Tierra[1]. El carbono es el componente básico de las Moléculas Orgánicas, que son las moléculas que conforman a los seres vivos. El carbono es uno de los componentes de la molécula de ADN[1]. Eso significa que nuestros cuerpos, y los cuerpos de otros animales, contienen carbono. Otras formas de carbono, como el grafito y el petróleo, son importantes para la sociedad humana[2]. El carbono también se encuentra en la atmósfera en forma de gas. Como el agua, el carbono es almacenado en la Tierra de formas diferentes[1]. La mayoría del carbono en la Tierra se encuentra almacenado en las rocas, pero también se puede encontrar en el océano y en el suelo[3]. Así como el Ciclo del Agua mantiene el agua fluyendo y balanceada en la Tierra, el Ciclo del Carbono mantiene el carbono fluyendo y balanceado [1].

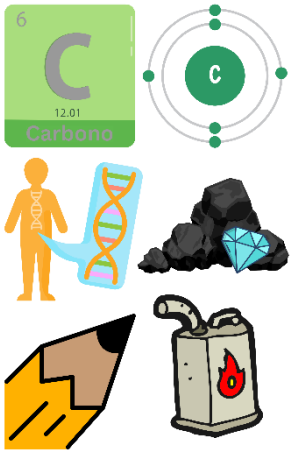


Figura 1. El elemento de la vida, Carbono, es un componente de muchas moléculas en la Tierra que son importantes para la vida y la sociedad.

El Ciclo del Carbono

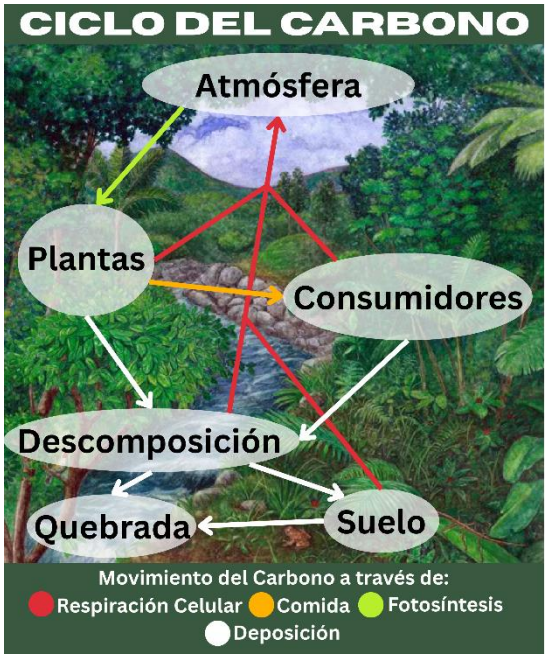


Figura 2. Un diagrama que muestra el ciclo del carbono en el Boque Nacional El Yunque. La dirección de las flechas muestra la dirección del movimiento del carbono, mientras que el color representa el proceso a través de cual se mueve.

Como el carbono es un componente de tantas moléculas, se mueve a través del planeta de deferentes maneras[3]. En la Figura 2 puedes observar cómo se mueve el Carbono a través del ecosistema de El Yunque. El carbono está presente en la atmosfera en moléculas de gas como el Dióxido de Carbono (CO_2). Las plantas atrapan el CO_2 de la atmósfera para llevar a cabo la fotosíntesis, que es el proceso celular a través del cual las plantas generan energía[1,3]. De esta forma, el carbono es almacenado en las plantas. El carbono se mueve a través del ecosistema en forma de comida. Los organismos vivos que están compuestos de carbono mueren y su carbono es depositado en el agua y el suelo a través del proceso de descomposición[1,3]. De esta forma, el carbono que es atrapado de la atmosfera por las plantas se mueve a través del ecosistema, pero ¿cómo regresa a la atmósfera? La respuesta es RESPIRACIÓN CELULAR.

The authors were supported in part by National Science Foundation grants DRL-2049061, DRL-1821146, DRL-1813802, and BIO-1831952. Any opinions, findings, and conclusions or recommendations expressed in this material are those of the authors and do not necessarily reflect the views of NSF.

RESPIRACIÓN DEL SUELO EN EL YUNQUE

Información de Trasfondo

Respiración, una parte del Ciclo del Carbono

Todos los organismos vivos necesitan energía para poder completar sus actividades. La energía dentro de las células toma la forma de trifosfato de adenosina (ATP)[4,5]. La energía de las células es transferida en forma de ATP[4]; cada molécula de ATP contiene 10 átomos de carbono[6]. Es como la moneda que paga por los procesos de las células[4]. ATP es la forma en la que las células pagan por la producción y el transporte de moléculas que necesitan para comunicarse y sintetizar ADN. Es la energía que los organismos usan para pensar, ventilar y reproducirse. El ATP es creado a partir de la comida a través de un proceso llamado *respiración*[4].

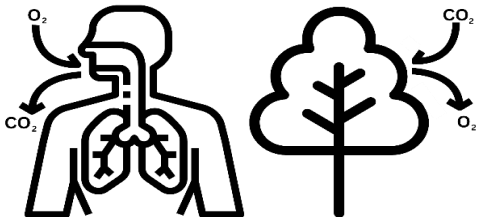


Figura 3. La ventilación, comúnmente llamada respiración, es un proceso a través del cual un organismo inhala y exhala aire. No todos los organismos ventilan igual. Algunos animales, como los humanos, utilizan sus pulmones. Las plantas ventilan a través de pequeños poros en sus hojas llamados estomas.

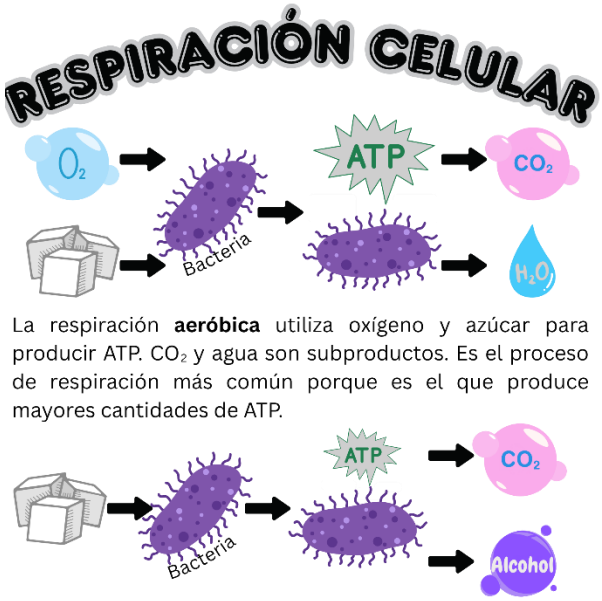


Figura 4. Existen diferentes tipos de respiración celular. El tipo de respiración celular depende del organismo y las moléculas disponibles en el ambiente.

La **respiración** es un proceso a través del cual las células crean energía en forma de ATP a partir de la comida[5]. Es la forma en la que el carbono se mueve a través de la cadena alimenticia, y es una parte importante del ciclo del carbono[3]. La respiración es un proceso que ocurre dentro de las células y no es lo mismo que la ventilación. La *ventilación* (comúnmente llamada respiración) es el proceso a través del cual un organismo atrapa y libera aire (Figura 3)[7]. Cuando un organismo inhala, este atrapa el aire que contiene moléculas necesarias para la respiración. Cuando un organismo exhala, este libera los gases que fueron producidos como subproducto de la respiración[7]. Existen diferentes tipos de respiración, y el tipo de respiración que realiza una célula depende del tipo de célula y las moléculas disponibles en su ambiente (Figura 4).

- **Respiración Aeróbica –** En la respiración aeróbica se utiliza el oxígeno para transformar las azucares de la comida en ATP. La mayoría de los animales y plantas utilizan la respiración aeróbica porque es la respiración con mayor producción de ATP. Para llevar a cabo esta reacción química, las células necesitan oxígeno y azúcar. Al final de

The authors were supported in part by National Science Foundation grants DRL-2049061, DRL-1821146, DRL-1813802, and BIO-1831952. Any opinions, findings, and conclusions or recommendations expressed in this material are those of the authors and do not necessarily reflect the views of NSF.

la reacción química se produce ATP, y se libera como subproductos CO_2 y agua[8].

- **Respiración Anaeróbica –** En la ausencia de oxígeno, las células pueden llevar a cabo respiración anaeróbica para producir ATP a partir de la comida[9]. Dependiendo del tipo de célula, se puede producir somo subproducto alcohol o ácido acético, además de CO_2. Organismos que viven en ambientes con bajas concentraciones de oxígeno, como bacterias y levaduras, llevan a cabo respiración anaeróbica y producen alcohol. Las células musculares de los animales pueden llevar a cabo respiración anaeróbica cuando hacen actividades físicas intensas como correr, y producen ácido láctico como subproducto[9].
- **Metanogénesis –** Es un tipo de respiración anaeróbica que utiliza CO_2 para producir ATP, liberando metano (CH_4) como un subproducto. La metanogénesis es llevada a cabo por microorganismos que pertenecen al dominio Arquea, que son llamados metanogenes[10].

Carbono y el Cambio Climático

El Dioxido de Carbono (CO_2) y el Metano (CH_4) son gases de invernadero. Los gases de invernadero que se encuentran en la atmosfera absorben la radiación y previene que esta escape del planeta, provocando el aumento de las temperaturas de la Tierra (Figura 5)[11]. El ciclo de carbono balancea la distribución del carbono en la Tierra para que no haya exceso de gases de invernadero en la atmosfera[1]. Esto mantiene las temperaturas de la Tierra estables[1]. Las actividades humanas como la quema de combustibles fósiles, la agricultura, y la deforestación, producen grandes cantidades de carbono en la forma de gases de invernadero, lo que altera el balance de carbono en la Tierra. Los gases de invernadero son contribuyentes principales del calentamiento global y el cambio climático[1,3].

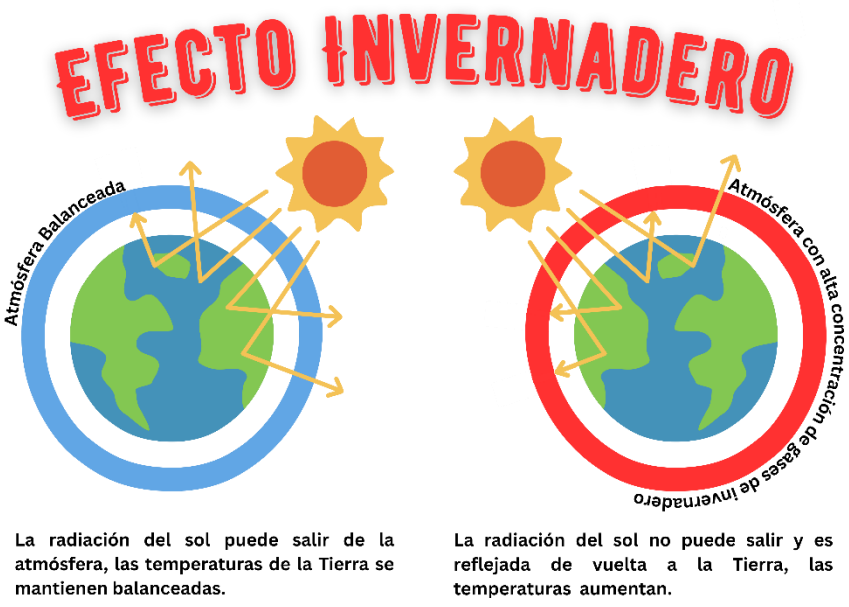


Figura 5. El Efecto Invernadero describe el proceso a través del cual los gases de invernadero atrapan el calor en la atmósfera causando un aumento en las temperaturas de la Tierra.

Ecosistemas y el Ciclo de Carbono

Cuando hablamos de ecosistemas nos referimos a las comunidades de organismos en un área que interactúan entre sí y con el medio ambiente[12]. Por ejemplo, El Yunque es un ecosistema terrestre. En El Yunque hay más 1,000 especies de plantas y alrededor de 164

The Learning Partnership · FORWARDLEARNING · Luquillo Long Term Ecological Research · Universidad de Puerto Rico · TERC

The authors were supported in part by National Science Foundation grants DRL-2049061, DRL-1821146, DRL-1813802, and BIO-1831952. Any opinions, findings, and conclusions or recommendations expressed in this material are those of the authors and do not necessarily reflect the views of NSF.

especies de animales que interactúan entre sí[13]. Los ecosistemas pueden ser de diferentes tamaños dependiendo de la escala en la cual se decide enfocar[12]. Por ejemplo, se pueden encontrar diferentes ecosistemas dentro de El Yunque, como los ríos[13]. Todos los individuos en un ecosistema están interconectados y dependen entre sí de forma directa o indirecta[12]. Todos los organismos en un ecosistema tienen una función, y sus actividades afectan las propiedades físicas y químicas del ecosistema. Esto se conoce como el funcionamiento de un ecosistema, y describe como se mueve la energía a través de este. El flujo de nutrientes es afectado por las actividades de los organismos en un ecosistema[14]. El funcionamiento de un ecosistema también determina los servicios que un ecosistema puede proveer a los humanos[15,14,16]. Los servicios ecosistémicos pueden ser directos o indirectos, y afectan el bienestar y la calidad de vida de los humanos. Un ejemplo de un servicio ecosistémico es la regulación de la calidad del aire y el clima[15,14,16]. Los ecosistemas pueden regular la calidad del aire y el clima a través de la respiración, porque todos los organismos vivos dentro de un ecosistema respiran, así que consumen y liberan gases.

La respiración de todos los seres vivos en un ecosistema determina la cantidad de gases – como CO_2, CH_4, y oxígeno – que son consumidos o liberados por el ecosistema. Cuando un ecosistema consume más CO_2 del que libera, entonces es llamado un **sumidero de CO_2**. Cuando un ecosistema libera más CO_2 del que consume, entonces es llamado una **fuente de CO_2**[17,18]. Las fuentes de CO_2 –como la quema de combustibles fósiles, deforestación, y actividades industriales – liberan CO_2 a la atmosfera, contribuyendo con el cambio climático. Por otro lado, los sumideros de CO_2 – como los océanos y lo bosques – consumen CO_2[17,18]. Así como el CO_2, el CH_4 también tiene fuentes y sumideros[19,20]. Las fuentes primarias de CH_4 son el ganado, minería, y vertederos. Los sumideros principales de CH_4 son la atmosfera y los suelos[19,20]. Es importante identificar las fuentes y los sumideros de los gases de invernadero porque este conocimiento nos ayuda a combatir el Cambio Climático (Figura 6). Para saber si un ecosistema está funcionando como una fuente o un sumidero los científicos miden el **flujo de gas** del ecosistema. El flujo de gas mide la cantidad de gas que se mueven hacia y desde un sistema por unidad de tiempo[18,21]. Si el flujo de gas es positivo, significa que el sistema está liberando gases y está funcionando como una fuente del gas que está siendo medido. Si el flujo de gas es negativo, significa que el sistema está consumiendo gases y está funcionando como un sumidero del gas que está siendo medido[18].

Figura 6. Muestra las fuentes y sumideros de Dióxido de Carbono y Metano, que son gases de invernadero.

The Learning Partnership · FORWARDLEARNING · Luquillo Long Term Ecological Research · Universidad de Puerto Rico · TERC

The authors were supported in part by National Science Foundation grants DRL-2049061, DRL-1821146, DRL-1813802, and BIO-1831952. Any opinions, findings, and conclusions or recommendations expressed in this material are those of the authors and do not necessarily reflect the views of NSF.

RESPIRACIÓN DEL SUELO EN EL YUNQUE

Información de Trasfondo

Los suelos, como nosotros, respiran

Los suelos están compuestos por minerales, materia orgánica, organismos vivos, gases y agua[22]. Los suelos son ecosistemas. Dentro de los suelos podemos encontrar muchos organismos vivos como bacterias, hongos, plantas, gusanos, mamíferos, aves, anfibios e insectos que interactúan entre sí. El grupo más diverso de seres vivos en los suelos son los microbios como las bacterias, arqueas y hongos[22]. Debido a la gran diversidad que se encuentra en ellos, los suelos son uno de los ecosistemas que proveen servicios más importantes de la Tierra[22,23]. Los suelos regulan el agua a través de la filtración y almacenamiento, lo que provee agua limpia y previene inundaciones. Los suelos ayudan con el ciclo de nutrientes, ya que muchos de los organismos que habitan los suelos son descomponedores. Los suelos son reguladores de gases. Todos los organismos que habitan los suelos respiran, así que intercambian gases[22,23].

Los suelos almacenan grandes cantidades de carbono que proviene de materia orgánica[23]. Cuando la materia orgánica en los suelos se descompone, se libera carbono a la atmosfera en forma de CO_2. Los suelos liberan grandes cantidades de CO_2 a la atmosfera; liberan más CO_2 que actividades antropogénicas como la quema de combustibles fósiles[23,24]. La respiración de los suelos es un indicador de la biodiversidad en estos, y su capacidad de sustentar vida[25]. Si la respiración del suelo disminuye, esto podría indicar que hay menos descomposición de materia orgánica, lo que significa que hay menos actividad microbiana. Una menor actividad microbiana puede afectar el ciclo de nutrientes, lo que puede afectar el bienestar de otros organismos que dependen de estos nutrientes para sobrevivir como las plantas[25]. Aunque los suelos liberan grandes cantidades de gases invernaderos a la atmosfera[26], en un ecosistema bien balanceado, las plantas y otros organismos fotosintéticos del ecosistema deberían atrapan la mayoría de estos gases de invernadero[27]. El problema surge cuando el balance del ecosistema se ve afectado, y la cantidad de gases de invernadero liberados es mayor de la que los organismos pueden consumir, convirtiendo el ecosistema en una fuente de gases de invernadero.

Figura 7. El Bosque Nacional El Yunque y sus suelos son ecosistemas importantes para la regulación de gases de invernadero.

The Learning Partnership · FORWARDLEARNING · LUQUILLO · Universidad de Puerto Rico · TERC

The authors were supported in part by National Science Foundation grants DRL-2049061, DRL-1821146, DRL-1813802, and BIO-1831952. Any opinions, findings, and conclusions or recommendations expressed in this material are those of the authors and do not necessarily reflect the views of NSF.

RESPIRACIÓN DEL SUELO EN EL YUNQUE

Información de Trasfondo

El cambio climático y el cambio de uso de terreno son los factores principales afectando la respiración de los suelos. Los cambios en temperatura y precipitación pueden afectar la respiración del suelo porque afectan la actividad microbiana[25,26]. Por ejemplo, si la humedad del suelo es muy baja, los organismos tienen acceso limitado a los nutrientes porque los nutrientes se mueven con el agua. Si la humedad es muy alta, la respiración aeróbica es limitada porque el agua ocupa el espacio y desplaza el oxígeno[25,26]. La agricultura y la deforestación – que son prácticas de cambio de uso de terreno – pueden afectar los nutrientes en el suelo y la composición de especies del ecosistema, resultando en cambios en la respiración del suelo[25,28]. El cambio climático y el cambio de uso de terrenos afecta el balance en los ecosistemas de suelo. Que un ecosistema funcione como una fuente o como un sumidero de gases de invernadero depende del balance en el ecosistema, las especies presentes en el ecosistema y sus actividades. Es importante monitorear el flujo de gases del ecosistema de suelos para ver como responden a los cambios y prevenir que se conviertan en fuentes de gases de invernadero.

Respiración de los Suelos en El Yunque

El Yunque es un bosque tropical, y los bosques tropicales son grandes contribuyentes de respiración de suelos[24,28] (Figura 7). Aunque los bosques tropicales consumen grandes cantidades de CO_2 cada año, estudios recientes demuestran que liberan la misma cantidad a través de la respiración de microorganismos y de las raíces de las plantas (respiración de suelo)[27]. El cambio climático, la deforestación, y la degradación de los bosques tropicales podría estar contribuyendo a la liberación de CO_2 porque el crecimiento de las plantas se ve afectado de forma negativa[27]. Por lo tanto, la protección de los bosques es muy importante para la regulación de los gases en la atmosfera y la desaceleración del cambio climático[28].

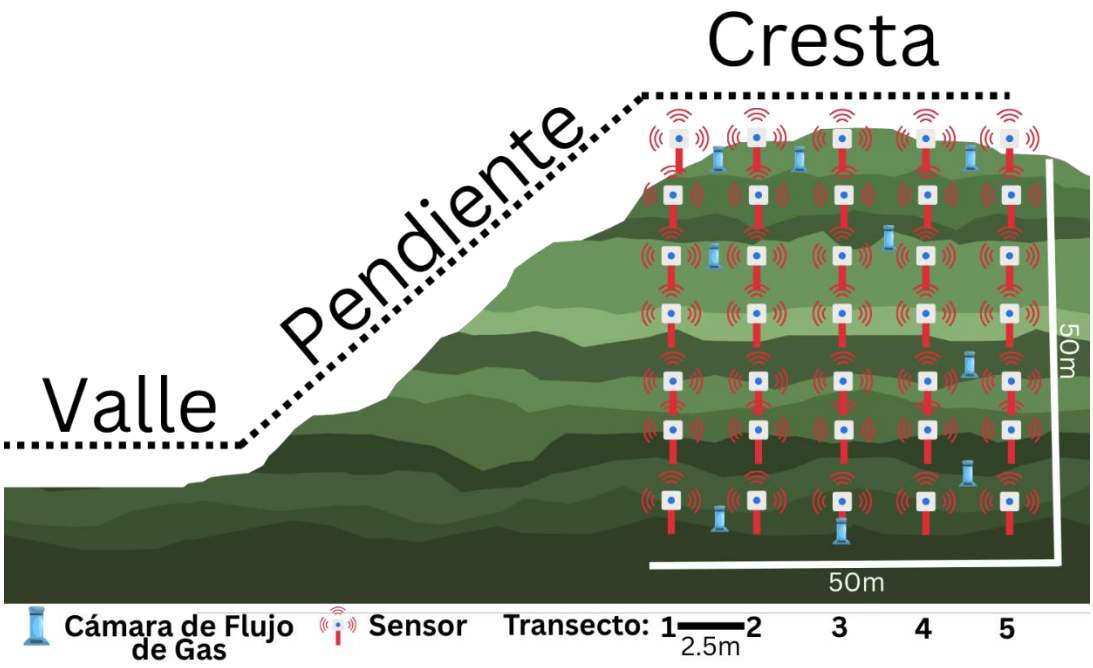


Figura 8. Un diagrama que muestra como están ubicados los sensores y cámaras de flujo de gas en los transectos dentro de la parcela en el sitio de estudio en El Verde.

The authors were supported in part by National Science Foundation grants DRL-2049061, DRL-1821146, DRL-1813802, and BIO-1831952. Any opinions, findings, and conclusions or recommendations expressed in this material are those of the authors and do not necessarily reflect the views of NSF.

RESPIRACIÓN DEL SUELO EN EL YUNQUE

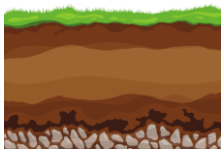
Información de Trasfondo

Los científicos en El Yunque están estudiando la respiración del suelo del bosque para entender sus contribuciones a la regulación de gases y ciclo de nutrientes, así como su respuesta al cambio climático. Un conjunto de datos derivado de estos estudios llevados a cabo por científicos en El Yunque puede ser accedido a través de Portal de Datos de Data Jam[29]. En este estudio, los científicos Estaban interesados en entender como las sequías pueden afectar la respiración del suelo en El Yunque, y como esta respuesta podría cambiar dependiendo de la localización topográfica a lo largo del gradiente de elevación de El Yunque[30].

La investigación fue llevada a cabo en la Estación Experimental de El Verde, dentro del Bosque Experimental de Luquillo (BEL) en El Yunque[29,30]. Los científicos trazaron cinco transectos a lo largo del gradiente de elevación del bosque. Los transectos se encontraban dentro de una parcela de 50 m por 50 m, con una distancia de 2.5 m entre ellos (Figura 8). Cada transecto tenía colocados de forma aleatoria 7 sensores que medían la concentración de oxígeno, la concentración de agua, y la temperatura del suelo cada hora. Para medir el flujo de CO_2 y CH_4, 9 cámaras de flujo de gas automatizadas fueron distribuidas de forma aleatoria a lo largo del gradiente de elevación: 3 en la cresta, 3 en la pendiente, y tres en el valle (Figura 9)[29,30]. Las cámaras fueron programadas de forma que los gases fueran medidos una cámara a la vez. Un ciclo de todas las cámaras de gas tomando medidas, una a la vez, podría durar hasta dos horas, resultando en 12 medidas por cámara por día[29,30]. La precipitación diaria era medida con un pluviómetro manual en la Estación Experimental de El Verde, que se encuentra cerca de lugar de estudio. La colecta de datos comenzó en Noviembre de 2014 y continúo hasta Febrero del 2016. Los datos capturan la Gran Sequía que afectó a Puerto Rico en el 2015[29,30]. El promedio de lluvia total por año en El Yunque era de 4219 mm por año entre el 2004 y 2013. En el 2015 la Lluvia total del año fue solo 2035 mm[30]. Los datos colectados en este estudio proveen evidencia de los cambios en la respiración celular del suelo, que es medida como el flujo de CO_2 y CH_4, durante el año de la Gran Sequía.

Figura 9. Las cámaras de flujo de gas y sensores ubicados dentro de la parcela en el sitio de estudio en El Verde. Los sensores están enterrados bajo tierra y las cajas blancas visibles están conectadas a ellos. Dentro de estas cajas se encuentran los registradores de datos, que son dispositivos que recopilan y almacenan los datos de los sensores.

The authors were supported in part by National Science Foundation grants DRL-2049061, DRL-1821146, DRL-1813802, and BIO-1831952. Any opinions, findings, and conclusions or recommendations expressed in this material are those of the authors and do not necessarily reflect the views of NSF.



RESPIRACIÓN DEL SUELO EN EL YUNQUE

Información de Trasfondo

Referencias

1. Riebeek, H. The Carbon Cycle. *NASA Earth Observatory* (2011).
2. The Editors of Encyclopaedia Britannica. Carbon. *Encycl. Br.* (2025).
3. National Oceanic and Atmospheric Administration. Carbon Cycle. *National Oceanic and Atmospheric Administration* (2025).
4. Dunn, J. & Grider, M. H. Physiology, Adenosine Triphosphate. in *StatPearls* (StatPearls Publishing, Treasure Island (FL), 2025).
5. Wakim, S. & Grewal, M. 5.9: Cellular Respiration. *Biology LibreTexts* https://bio.libretexts.org/Bookshelves/Human_Biology/Human_Biology_(Wakim_and_Grewal)/05%3A_Cells/5.09%3A_Cellular_Respiration (2018).
6. National Center for Biotechnology Information. PubChem Compound Summary for CID 5957, Adenosine Triphosphate. *PubChem* https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Adenosine-Triphosphate. (2025).
7. National Heart, Lung, and Blood Institute. How the Lungs Work - What Breathing Does for the Body. *NIH* https://www.nhlbi.nih.gov/health/lungs/breathing-benefits (2022).
8. Kaiser, G. 18.3: Aerobic Respiration. *Biology LibreTexts* https://bio.libretexts.org/Bookshelves/Microbiology/Microbiology_(Kaiser)/Unit_7%3A_Microbial_Genetics_and_Microbial_Metabolism/18%3A_Microbial_Metabolism/18.3%3A_Aerobic_Respiration (2016).
9. Wakim, S. & Grewal, M. 5.9: Anaerobic Respiration. *Biology LibreTexts* https://bio.libretexts.org/Courses/Butte_College/BC%3A_BIOL_2_-_Introduction_to_Human_Biology_(Grewal)/Text/05%3A_Cells/5.09%3A_Anaerobic_Respiration (2019).
10. Lyu, Z., Shao, N., Akinyemi, T. & Whitman, W. B. Methanogenesis. *Curr. Biol.* **28**, R727–R732 (2018).
11. US Environmental Protection Agency. Overview of Greenhouse Gases. https://www.epa.gov/ghgemissions/overview-greenhouse-gases (2015).
12. Rutledge, K. *et al.* Ecosystem. *National Geographic Education* https://education.nationalgeographic.org/resource/ecosystem (2025).
13. Quiñones, M. *et al. El Yunque National Forest Atlas*. 63 https://research.fs.usda.gov/treesearch/56095 (2018).
14. Truchy, A., Angeler, D. G., Sponseller, R. A., Johnson, R. K. & McKie, B. G. Chapter Two - Linking Biodiversity, Ecosystem Functioning and Services, and Ecological Resilience: Towards an Integrative Framework for Improved Management. in *Advances in Ecological Research* (eds. Woodward, G. & Bohan, D. A.) vol. 53 55–96 (Academic Press, 2015).
15. *Ecosystems and Human Well-Being: A Framework for Assessment*. (Island Press, Washington, DC, 2003).
16. Scotland's Nature Agency. Ecosystem services - nature's benefits. *NatureScot* https://www.nature.scot/scotlands-biodiversity/scottish-biodiversity-strategy/ecosystem-approach/ecosystem-services-natures-benefits (2025).
17. Włodarczyk, T. GREENHOUSE GASES SINK IN SOILS. in *Encyclopedia of Agrophysics* (eds. Gliński, J., Horabik, J. & Lipiec, J.) 351–354 (Springer, Dordrecht, 2011). doi:10.1007/978-90-481-3585-1_64.
18. Copernicus. Greenhouse Gas Fluxes. *Copernicus* https://climate.copernicus.eu/ESOTC/2019/greenhouse-gas-fluxes#:~:text=Regional%20variations%20in%20CO%E2%82%82%20fluxes%20due%20to%20natural%20effects,-Annual%20net%20CO%E2%82%82&text=Positive%20values%20indicate%20that%20the,/LSCE%20/TNO%20/NILU. (2020).
19. Heilig, G. K. The greenhouse gas methane (CH4): Sources and sinks, the impact of population growth, possible interventions. *Popul. Environ.* **16**, 109–137 (1994).
20. Saunois, M. *et al.* The global methane budget 2000–2012. *Earth Syst. Sci. Data* **8**, 697–751 (2016).
21. Hatano, R. Greenhouse Gas Fluxes: Effects of Physical Conditions. in *Encyclopedia of Agrophysics* (eds. Gliński, J., Horabik, J. & Lipiec, J.) 339–351 (Springer, Dordrecht, 2011). doi:10.1007/978-90-481-3585-1_64.
22. Needelman, B. A. What Are Soils? *Nature Education Knowledge* vol. 4 (2013).
23. Haygarth, P. M. & Ritz, K. The future of soils and land use in the UK: Soil systems for the provision of land-based ecosystem services. *Land Use Policy* **26**, S187–S197 (2009).
24. King, B. Cooling CO2 Emissions: Can we reduce carbon dioxide emissions by simply allowing forests to recover? *Smithsonian Tropical Research Institute* https://stri.si.edu/story/cooling-co2-emissions (2024).
25. USDA Natural Resources Conservation Service. Soil Quality Indicators. (2009).
26. Nissan, A. *et al.* Global warming accelerates soil heterotrophic respiration. *Nat. Commun.* **14**, 3452 (2023).
27. Mitchard, E. T. A. The tropical forest carbon cycle and climate change. *Nature* **559**, 527–534 (2018).
28. Beckstoffer, C., Hall, J. S. & Silver, W. L. Rapid recovery of soil respiration during tropical forest secondary succession on former pastures. *For. Ecol. Manag.* **572**, 122263 (2024).
29. Silver, W. 2015 Drought soil biogeochemistry and greenhouse gas emissions study at El Verde ver 3. *Environmental Data Initiative* https://doi.org/10.6073/pasta/7fba7dd30976c622e68638a2aa775ad2 (2023).
30. O'Connell, C. S., Ruan, L. & Silver, W. L. Drought drives rapid shifts in tropical rainforest soil biogeochemistry and greenhouse gas emissions. *Nat. Commun.* **9**, 1348 (2018).

The authors were supported in part by National Science Foundation grants DRL-2049061, DRL-1821146, DRL-1813802, and BIO-1831952. Any opinions, findings, and conclusions or recommendations expressed in this material are those of the authors and do not necessarily reflect the views of NSF.