

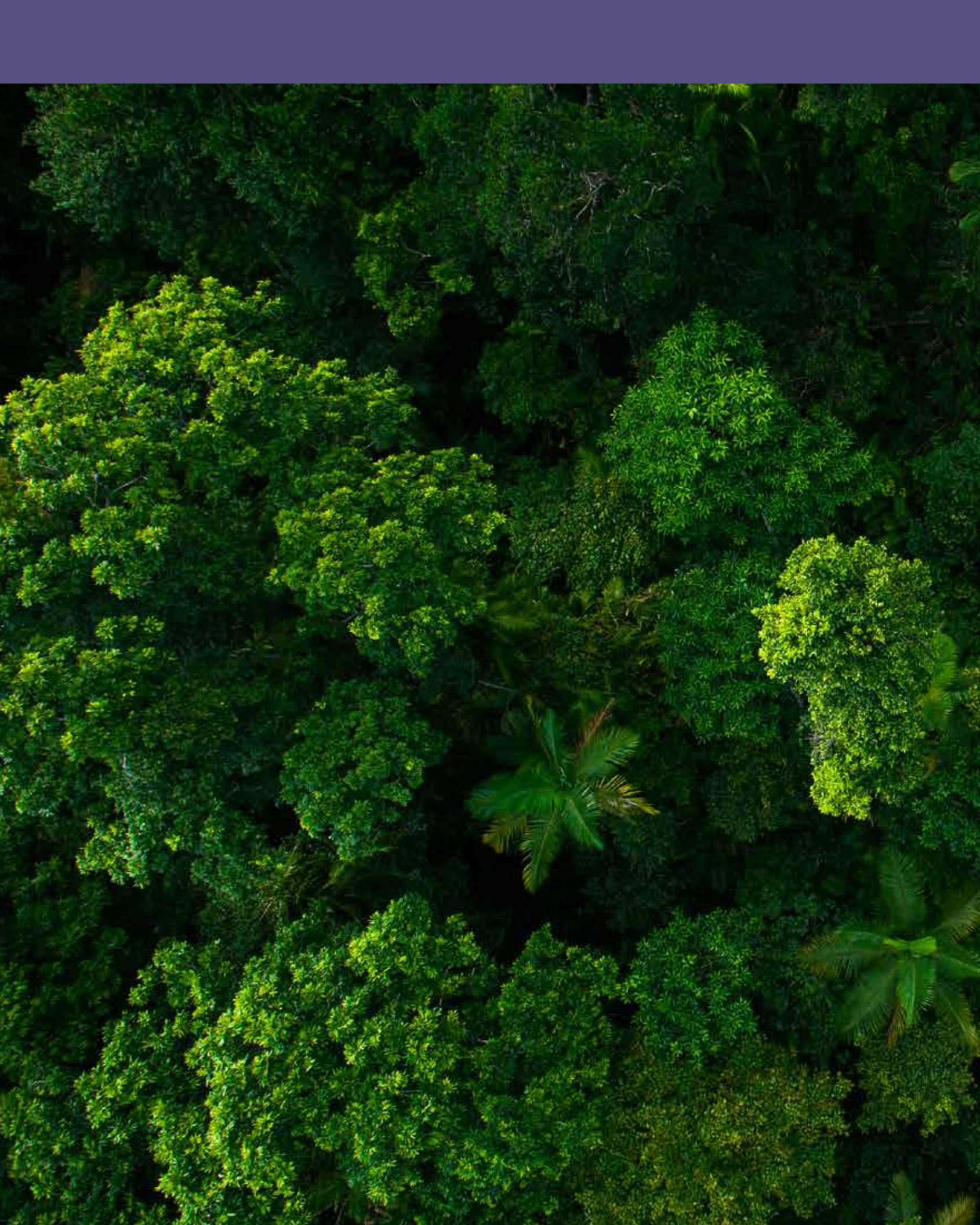
Una revisión de los datos geoespaciales a disposición del público e indicadores en apoyo del monitoreo de la degradación de la tierra

Gabriel Antunes Daldegan, Monica Noon, Alex Zvoleff, Mariano Gonzalez-Roglich
Moore Center for Science, Conservation International



© Conservation International/photo by Tristan Schnader





Hoja de ruta para mejoras de datos de Trends.Earth
como parte del proyecto Tools4LDN

Una revisión de los datos geoespaciales a disposición del público e indicadores en apoyo del monitoreo de la degradación de la tierra¹

Gabriel Antunes Daldegan, Monica Noon, Alex Zvoleff, Mariano Gonzalez-Roglich

Moore Center for Science, Conservation International

Revisores: Sara Minelli (United Nations Convention to Combat Desertification Secretariat), Neil Sims (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation), Jeff Herrick (United States Department of Agriculture), Alastair Graham (Geoger Ltd.), Vivek Vyas (formerly National Consultant, LDN-TSP, India for UNCCD), David Lopez-Carr (University of California - Santa Barbara), Kevin Mwenda (Brown University), and Graham Maltitz (Council for Scientific Industrial Research – Pretoria)

¹ Este informe ha sido elaborado como un resultado del proyecto financiado por el Fondo para el Medio Ambiente Mundial (FMAM): “Fortalecimiento de los datos y la toma de decisiones sobre la Neutralidad de la degradación de la tierra a través de las plataformas de acceso libre y abierto”. Para mayor información sobre el proyecto, sírvase ir a <https://www.tools4ldn.org/>. Este proyecto es una colaboración de Conservación Internacional, la Universidad de Berna, la Universidad de Colorado y la Universidad de California en Santa Bárbara.

Acrónimos

AVHRR	Radiómetro avanzado de muy alta resolución	GFW	Global Forest Watch
BRDF	Función de distribución de reflectancia bidireccional	GIMMS	Sistema de Monitoreo y Modelado de Inventario Global
CBERS-4	Satélite de recursos terrestres China-Brasil	GLAD	Análisis y descubrimiento terrestre global
CCI	Iniciativa de Cambio Climático	GLC	Global Land Cover
CEOS	Comité sobre Satélites de Observación de la Tierra	GBP	Guía sobre Buenas Prácticas
CGLS	Copernicus Global Land Service	GSOC	Carbono orgánico del suelo global
CI	Conservación Internacional	IAF	Índice de área foliar
CIAT	Centro Internacional de Agricultura Tropical	INPE	Instituto Nacional de Investigación Espacial del Brasil
CDP	Conferencia de las partes	ISRIC	Centro Internacional de Referencias e Información sobre el Suelo
DLA	Datos listos para su análisis	LandPKS	Sistema de conocimiento sobre el potencial de la tierra
DPT	Dinámica de la productividad de la tierra	LP DAAC	Centro Activo de Archivo Distribuido sobre Procesos de la Tierra
DVI	Índice de diferencia de vegetación	MODIS	Espectrorradiómetro de imágenes de resolución moderada
EO	Observación de la Tierra	MSAVI	Índice de vegetación ajustado al suelo modificado
ESA	Agencia Espacial Europea	MSI	Instrumentos multiespectrales
ETM+	Trazador temático cartográfico mejorado Plus	NASA	Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio - EE.UU
EUL	Eficiencia en el uso de la luz	NDT	Neutralidad de la degradación de la tierra
EVI	Índice de vegetación mejorado	PPB	Productividad primaria bruta
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación	PPNA	Productividad primaria neta anual
GEE	Google Earth Engine		
GEF	Fondo para el Medio Ambiente Mundial		
GEO	Grupo de Observaciones de la Tierra		
GEO LDN	Grupo de Observaciones de la Tierra sobre Neutralidad de la degradación de la tierra		

Resumen Ejecutivo

La degradación de la tierra afecta el sustento de millones de personas en todo el mundo. La disminución de la productividad global y la reducción de la capacidad de recuperación de cara a los cambios climáticos y ambientales determinan la necesidad de hacer frente a la degradación de la tierra como una prioridad global, formalizada por la Convención de las Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación (CNULD) y los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), en particular el Objetivo del ODS 15.3 sobre Neutralidad de la degradación de la tierra (NDT).

El marco científico de la NDT proporciona la base conceptual de cómo lograr la NDT, mientras que la Guía sobre Buenas Prácticas (GBP) del ODS 15.3.1 describe un conjunto de opciones metodológicas que los países pueden seguir para realizar las evaluaciones de degradación de la tierra en función de sus capacidades locales. Sin embargo, para muchos países la escasez de recursos y de capacidad humana han limitado su capacidad de poner en práctica dichas recomendaciones. Para abordar esta necesidad, se desarrolló Trends.Earth como una plataforma libre de código abierto que proporciona métodos estandarizados, siguiendo la GBP del ODS 15.3.1, y productos globales depurados para el desarrollo de evaluaciones sobre degradación de la tierra. Más de 130 países fueron capacitados para utilizar Trends.Earth para el ciclo de informes del ODS 15.3 de 2018, reduciendo significativamente las barreras técnicas para proporcionar evaluaciones sólidas sobre degradación de la tierra. Los representantes de los países, la CNULD, los científicos y el Grupo de Observaciones de la Tierra (GEO) reconocieron la importante contribución de Trends.Earth para apoyar el logro de la neutralidad de la degradación de la tierra, y al mismo tiempo identificar numerosas áreas de mejora que permitirían un monitoreo más robusto. El objetivo de este informe es examinar los productos geoespaciales disponibles en la actualidad que podrían utilizarse en apoyo del monitoreo de los tres subindicadores del ODS 15.3.1: tendencias en la cobertura de la tierra, tendencias en la productividad de la tierra, y tendencias en las existencias de carbono, con el fin de mejorar la funcionalidad de Trends.Earth antes del ciclo de informes del ODS 15.3 de 2022.

Los sensores remotos o teledetección ofrecen el método más rentable para vigilar y evaluar los cambios a gran escala de la superficie de la tierra. Diferentes productos espacialmente explícitos, con una resolución espacial relativamente fina (10 - 30 m), han estado disponibles en las últimas décadas sin costo alguno para los usuarios finales; estos datos, combinados con el poder del procesamiento de cálculos en la nube, han permitido la evaluación de las fuerzas naturales y antropogénicas que modifican las estructuras de la tierra y el procesamiento a través de largas series temporales. Con base en la revisión de productos geoespaciales globales actualmente disponibles, hemos identificado productos con resolución espacial fina (10 – 30 m) que tienen un potencial significativo para contribuir a la evaluación de productos que complementen la degradación de la tierra a una resolución espacial de moderada a gruesa y que ya han sido utilizados. La colección Landsat-Sentinel armonizada es el más prometedor de los productos, dada su alta resolución espacial (10 - 30 m) en combinación con una alta frecuencia de repasos (visitas repetidas cada 3 a 4 días). El Índice de Diferencia de Vegetación Normalizado (NDVI por sus siglas en inglés) es el índice de vegetación más estudiado y aceptado, por lo que es la opción preferida para evaluar los cambios en la productividad de la tierra, aunque las limitaciones en algunas condiciones indicarían que otros índices de vegetación más adecuados podrían proporcionar un mejor conocimiento de la tendencias de productividad. Hemos identificado otros dos índices de vegetación que pueden mejorar las evaluaciones en condiciones particulares: para aquellas áreas de biomasa elevada, el Índice de Vegetación Mejorado a dos bandas (EVI2); y para las zonas con baja biomasa, el Índice de Vegetación Ajustado al Suelo Modificado (MSAVI). Con base en esta revisión, se sugiere

desarrollar las capacidades de procesamiento en Trends.Earth para el cálculo de indicadores de productividad utilizando la colección Landsat-Sentinel armonizada con NDVI, EVI2, y MSAVI a fin de mejorar el seguimiento de los cambios en la condición de la tierra y así complementar la evaluación actual producida con series de datos a largo plazo MODIS NDVI. También debe añadirse un manual de usuario detallado sobre las condiciones en las que cada indicador debe ser utilizado. No se ha identificado nuevos productos globales con resolución espacial más fina como disponibles con respecto de la cobertura de la tierra y el carbono orgánico del suelo. Trends.Earth seguirá apoyando los productos globales actuales, y verificará periódicamente con los proveedores de datos para incorporar cualquier nuevo producto pertinente que pudiera añadirse a la herramienta si cumple con las recomendaciones y requisitos de calidad determinados por la GBP del ODS 15.3.1 y la Iniciativa GEO LDN.



Contenido

TRENDS.EARTH Y EL PROYECTO TOOLS4LDN	6
INDICADOR DEL ODS 15.3.1: PROPORCIÓN DE TIERRA DEGRADADA EN RELACIÓN CON LA SUPERFICIE TOTAL.....	10
PRODUCTOS GLOBALES DISPONIBLES ACTUALMENTE EN TRENDS.EARTH.....	10
MEDICIÓN DE LOS CAMBIOS EN LA PRODUCTIVIDAD DE LA TIERRA.....	12
Productividad primaria bruta - PPB	13
Productividad primaria neta - PPN	15
Índices de vegetación derivados de sensores remotos (teledetección)	17
a. Índice de Diferencia de Vegetación Normalizado (NDVI) - NDVI.....	18
b. Índice de Vegetación Mejorado - EVI	18
c. Índice de Vegetación Mejorado 2 - EVI2.....	19
d. Índice de Vegetación Ajustado al Suelo – SAVI.....	19
e. Índice de Vegetación Ajustado al Suelo Modificado – MSAVI.....	20
f. Índice de Vegetación Total Ajustado al Suelo – SATVI	20
g. Índice de Fenología Vegetal - PPI.....	21
Imágenes multiespectrales a disposición del público	24
MEDICIÓN DE LOS CAMBIOS EN LAS EXISTENCIAS DE CARBONO ORGÁNICO DEL SUELO	32
CONCLUSIONES.....	34
REFERENCIAS.....	35
APÉNDICE	40

Trends.Earth y el Proyecto Tools4LDN

El Proyecto de Monitoreo de la Degradación de la Tierra (LDMP), un proyecto financiado por el Fondo Mundial para el Medio Ambiente (FMAM) en su sexta reposición, fue diseñado para proporcionar una guía sobre métodos robustos y una caja de herramientas para evaluar, monitorear y estimar las tendencias de degradación de la tierra empleando sensores remotos y otros productos geoespaciales. El proyecto se inspiró en un estudio encargado por el Grupo Asesor Científico y Técnico (STAP por sus siglas en inglés) del FMAM sobre el uso de NDVI en el monitoreo de la degradación de la tierra.

Numerosos procesos internacionales, incluida la Convención de las Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación (CNULD), el Convenio sobre la Diversidad Biológica (CDB), la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) y los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) han puesto de manifiesto la degradación de la tierra como un desafío clave para el desarrollo, y que la falta de información confiable y métodos rentables para la recolección y análisis de datos limita el desarrollo de políticas para hacer frente a este reto. El STAP se acercó a Vital Signs, la Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio (NASA) y la Agencia Espacial Europea (ESA) para desarrollar una propuesta para abordar la cuestión de la degradación de la tierra, lo que se traduce en el proyecto LDMP.

Uno de los principales resultados del proyecto incluyó una herramienta gratuita y de código abierto - Trends.Earth (Trends.Earth, 2018) - para el seguimiento de las tendencias de degradación de la tierra, y la creación de un conjunto de documentos de orientación para apoyar su uso. Trends.Earth permite a los usuarios no técnicos integrar datos nacionales con información de productos globales para rastrear los cambios en los indicadores de la degradación de la tierra. La orientación y las herramientas del Proyecto se pueden emplear para ayudar a la toma de decisiones sobre ordenamiento territorial e inversiones, así como para mejorar la presentación de informes a la CNULD y al FMAM. Trends.Earth es una plataforma de datos abierta que está disponible gratuitamente como un bien público global.

Una característica novedosa de Trends.Earth es el uso de la computación en la nube - mediante el uso del Google Earth Engine (GEE), la caja de herramientas hace posible que

los usuarios con capacidad de procesamiento limitada y sin conocimiento experto de la computación en la nube puedan realizar cálculos complejos sobre grandes productos (lo que permite el análisis de la degradación de la tierra a escalas nacionales a globales) en cuestión de minutos. Mientras que los beneficios del enfoque basado en la nube son claros (hasta la fecha más de 3.000 usuarios se han registrado para utilizar la herramienta), el equipo del proyecto también reconoce que en muchas regiones la conectividad a Internet limita el uso de las herramientas basadas en la nube. Por esa razón, Trends.Earth también es compatible con la computación fuera de línea para cálculo de los indicadores (para áreas donde la conectividad a Internet puede ser limitada). Este doble enfoque le permitió al proyecto maximizar su alcance y satisfacer las necesidades de la mayoría de las partes interesadas. Trends.Earth apoya el cálculo de los tres indicadores (cambios en la productividad de la tierra, la cobertura de la tierra y las existencias de carbono) para vigilar la consecución de la Neutralidad de la degradación de la tierra (NDT), lo que permite el uso de un conjunto de métodos normalizados y recomendados para la estimación de los indicadores de la degradación de la tierra, mientras que proporciona la flexibilidad a los usuarios para que puedan personalizar los métodos dependiendo de las circunstancias locales y la disponibilidad de datos nacionales.

Trends.Earth es una herramienta que ha demostrado ser valiosa para facilitar la evaluación de la condición de la tierra a escala nacional mediante el uso de datos de Observación de la Tierra (EO) con potencial de informar a escala subnacional. Con base en la retroalimentación recibida de los usuarios, partes interesadas y socios, fue posible identificar áreas clave para el mejoramiento de la herramienta, lo que

beneficiaría en gran medida la planificación y el seguimiento de la NDT. Dichas áreas de mejoramiento son: 1) mejorar la resolución espacial de los datos geoespaciales, 2) aumentar las capacidades para vincular el análisis con sensores remotos con los datos in situ para fines de verificación, 3) enlazar sensores remotos con los procesos de evaluación participativa para incluir el conocimiento local y aumentar el sentido de propiedad sobre los resultados, y 4) incorporar herramientas de soporte de decisiones para evaluar las ventajas y desventajas de las diferentes actividades propuestas y reportar a la planificación de la NDT. Para hacer frente a estas necesidades, Conservación Internacional se asoció con la Universidad de Colorado (Sistema de conocimiento sobre el potencial de la tierra - LandPKS), la Universidad de Berna (Reseña mundial de enfoques y tecnologías de la conservación - WOCAT) y la Universidad de California en Santa Bárbara (Instituto de Salud Planetaria) para diseñar y poner en práctica el proyecto financiado por el FMAM llamado "Fortalecimiento de los datos sobre la neutralidad de la degradación de la tierra y la toma de decisiones a través de plataformas de acceso libre y abierto" (en adelante conocido como Tools4LDN).

El objetivo del proyecto Tools4LDN es proporcionar métodos mejorados para evaluar la degradación de la tierra y entender las condiciones socioeconómicas de las comunidades vulnerables en las zonas afectadas, a través de la integración de plataformas libres y abiertas que apoyen la presentación de informes a nivel nacional ante la CNULD (período de ejecución del proyecto: octubre de 2019 a septiembre de 2021). El proyecto tiene cuatro componentes principales:

- **Componente 1:** Mejorar los indicadores biofísicos de la degradación de la tierra para apoyar el monitoreo hacia la neutralidad de la degradación de la tierra: Trends.Earth actualmente proporciona productos globales a resoluciones de 250-300 m. A pesar de que Trends.Earth apoya el uso de productos con resolución espacial más alta proporcionados por el usuario, la mayoría de las partes de la CNULD utiliza datos por defecto al reportar los indicadores de avance basados en el suelo, lo que subraya la utilidad, conveniencia y necesidad de datos a nivel global preparados de manera coherente, lo que reduce para muchos países las barreras relacionadas con la presentación de informes. En virtud de este componente, se añadirán nuevos productos y algoritmos a Trends.Earth para proporcionar mejores indicadores de resolución espacial (10-30 m) para los tres indicadores basados en el

suelo: cambios en la productividad primaria, cobertura de la tierra y carbono orgánico del suelo. Los datos de mayor resolución espacial serán fundamentales para dar seguimiento a los cambios en la condición de la tierra de las actividades sobre el terreno, y facilitar el seguimiento de las diferentes actividades de ordenamiento territorial aplicadas en apoyo de la NDT.

- **Componente 2:** Entender las interacciones socioambientales entre la sequía, la degradación de la tierra y la pobreza, para apoyar el desarrollo de marcos de monitoreo de los objetivos estratégicos (OE) 2 y 3 de la CNULD: Bajo este componente se evaluará, en estrecha colaboración con la CNULD, la Organización Meteorológica Mundial y otros actores clave, los productos y enfoques para la evaluación de las interacciones socioambientales entre la sequía, la degradación de la tierra y la pobreza. Los productos globales (que representan variables biofísicas y socioeconómicas) y los enfoques se integrarán en Trends.Earth a fin de permitir a los usuarios ejecutar evaluaciones a nivel nacional para entender los riesgos que la sequía y la pobreza podrían suponer para las comunidades más vulnerables, con el fin de mejorar su resiliencia y bienestar. Los productos globales en apoyo de la presentación de informes sobre el OE 2 y el OE 3 serán evaluados y puestos a disposición de los usuarios a través de Trends.Earth.
- **Componente 3:** Apoyar la planificación y el monitoreo de las prioridades de la NDT desde el campo hasta escala nacional: Hasta ahora, Trends.Earth ha proporcionado funcionalidades para evaluar cambios históricos en la condición de la tierra. Relacionar las evaluaciones basadas por satélite con la información en terreno es clave; sin embargo, muchos usuarios han indicado que carecen de los conocimientos y los recursos para llevar a cabo dichos análisis. Trends.Earth se ha asociado con WOCAT y LandPKS para facilitar la integración del análisis de sensores remotos con la información sobre ordenamiento territorial recabada a través de una aplicación móvil para este proyecto. Esto permitirá una verificación sistemática de las tendencias de degradación y el monitoreo del avance realizado en el marco del Programa de Fijación de Objetivos sobre NDT (NDT-TSP), y al mismo tiempo recoger información sobre la condición de la tierra y la gestión territorial en terreno, la que será fundamental para los procesos de planificación posteriores. Se

evaluarán otras herramientas de acceso libre para evaluar la condición de la tierra y su cambio, como Collect Earth (OpenForis, 2020), y se desarrollarán flujos de trabajo integrados para apoyar la integración de los usuarios. Estas evaluaciones serán insumos para una herramienta sencilla de apoyo a la toma de decisiones que permitirá a los usuarios identificar las prioridades de intervención a escala nacional y subnacional. Estas herramientas y enfoques se pondrán a prueba en diferentes zonas geográficas dentro de un país piloto, y se proporcionarán estudios de caso que brindarán ejemplos de aplicaciones para ampliar la herramienta a un mayor número de usuarios. Un taller de capacitación se llevará a cabo en el país piloto con la participación equitativa de mujeres y hombres, y se centrará en las evaluaciones integradas con el empleo de Trends.Earth, WOCAT y LandPKS.

- **Componente 4:** Ayudar a la CNUCLD y sus países firmantes mediante la creación de capacidades en apoyo de la planificación, supervisión y presentación de informes: desde que se lanzó a finales de 2017, Trends.Earth ha apoyado una base de usuarios de más de 3.000 participantes registrados. Con las mejoras y los nuevos módulos que se añadirán a la herramienta bajo el proyecto propuesto actual, se espera que este número al menos se triplique en los próximos tres años. Por esa razón, es fundamental actualizar y mantener la documentación y los recursos de capacitación disponibles a través del sitio web del proyecto, y proporcionar a los usuarios el apoyo y la formación necesarios que permitan una participación equitativa de las mujeres y los hombres. La documentación al día y los cursos de capacitación en línea incluirán directrices para las evaluaciones integradas que usen Trends.Earth, LandPKS, WOCAT y Collect Earth, maximizando la utilidad de los datos obtenidos por sensores remotos, los datos de campo y el conocimiento experto local. Para apoyar a los países firmantes de la CNUCLD en sus necesidades de presentación de informes para el ciclo 2021-2022, llevaremos a cabo un taller de capacitación técnica sobre herramientas y métodos para el seguimiento del avance de los objetivos estratégicos en una reunión de las partes de la CNUCLD.

Se completó una revisión de los productos e indicadores geoespaciales pertinentes para el ODS 15.3.1 antes de la implementación de las mejoras técnicas del componente 1. Este informe se centra en la revisión de los productos e indicadores que han sido publicados o puestos a disposición

del público desde el lanzamiento de la Guía de Buenas Prácticas del ODS 15.3.1 (Sims et al., 2017) hasta julio de 2020. Los sitios web consultados incluyen: [Agencia Espacial Europea - ESA](#), [Organización para la Agricultura y la Alimentación - FAO](#), [GitHub](#), [Global Forest Watch - GFW](#), [Google Earth Engine - GEE](#), [Google Scholar \(académico\)](#), [Grupo de Observaciones de la Tierra - GEO](#), [Instituto Nacional de Investigaciones Espaciales - INPE](#), [Centro Internacional de Agricultura Tropical - CIAT](#), [Centro Internacional de Referencias e Información sobre el Suelo - ISRIC](#), [Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio - NASA](#), [Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica - NOAA](#), [Análisis y descubrimiento terrestre global - GLAD](#), [Centro Mundial de Vigilancia de la Conservación de la ONU - PNUMA - CMCM](#), [Servicio Geológico de los Estados Unidos - USGS](#), [Web de la Ciencia](#), [Centro de Investigación Climática Woodwell - WCRC](#), [Centro Mundial de Agroforestería](#). Todos los productos que figuran en este informe deben cumplir con los siguientes criterios de aplicación::

- Sigue la Guía de Buenas Prácticas del ODS 15.3.1 (Sims et al, 2017)
- Sigue la orientación GEO LDN WG2 sobre normas de calidad de datos (GEO LDN, 2020a)
- Presenta cobertura global
- Disponible sin costo para el usuario final
- Proporciona documentación detallada de conocimiento público sobre las fuentes de datos, su procesamiento y calidad.

Aunque hemos realizado una investigación exhaustiva en las revistas científicas, los sitios web y repositorios de datos a disposición del público con el objetivo de que este reporte sea lo más completo posible, constantemente se están desarrollando o actualizando nuevos productos y métodos. Por lo tanto, reconocemos que puede haber otros productos espacialmente explícitos que satisfacen estos criterios y que no figuran en esta lista. Si tiene conocimiento de productos geoespaciales que pudieran añadirse a la caja de herramientas para mejorar las evaluaciones de degradación de la tierra, póngase en contacto con nosotros en trends.earth@conservation.org.



Indicador del ODS 15.3.1: Proporción de tierra degradada en relación con la superficie total

En 2015 las Naciones Unidas (ONU) publicaron el documento «La transformación de nuestro mundo: la Agenda 2030 para el desarrollo sostenible» (ONU, 2015) en el que se pone en marcha un conjunto de 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) que guiarían a la comunidad internacional acerca de los retos sociales, ambientales y económicos que deben ser abordados para 2030 (ODS, 2020).



Diseñado para salvaguardar la vida terrestre, el ODS 15 tiene como objetivo «proteger, restablecer y promover el uso sostenible de los ecosistemas terrestres, efectuar una ordenación sostenible de los

bosques, luchar contra la desertificación, detener y revertir la degradación de la tierra y poner freno a la pérdida de la diversidad biológica». El ODS 15 tiene objetivos específicos para abordar los diferentes componentes de la sostenibilidad de la tierra; el objetivo 15.3 es «Para 2030, luchar contra la desertificación, rehabilitar las tierras y los suelos degradados, incluidas las tierras afectadas por la desertificación, la sequía y las inundaciones, y procurar lograr un mundo con una degradación neutra del suelo.»

La CNULD, la agencia que custodia el ODS 15.3, define la NDT como «una situación en que la cantidad y la calidad de los recursos de las tierras necesarios para sustentar las funciones y los servicios ecosistémicos e incrementar la seguridad alimentaria se mantienen estables o aumentan dentro de una determinada escala temporal y espacial.» Se utilizan indicadores específicos para estimar el avance de cada ODS; en el caso del objetivo 15.3 del ODS, el progreso hacia un mundo con una degradación neutra del suelo está siendo evaluado por el indicador 15.3.1 “proporción de la tierra degradada en relación con la superficie total”. Para estimar la degradación de la tierra, el enfoque propuesto se basa en tres subindicadores biofísicos: cambios en la productividad de la tierra, cobertura vegetal, y en las existencias de carbono del suelo (CNULD, 2016).

Con el fin de monitorear el avance hacia el logro de la NDT para el año 2030, los países estimaron los niveles de referencia de la degradación del suelo para el periodo 2000-2015. Estos análisis se realizaron mediante el uso de una combinación de datos globales y nacionales, dependiendo de la disponibilidad de recursos del país. La CNULD destacó que, para la primera ronda de informes sobre NDT, proporcionar datos geospaciales por defecto coherentes a nivel mundial y fácilmente disponibles fue clave para permitir a los países Partes evaluar eficientemente los indicadores de avance basados en el suelo (CNULD, 2018). La CNULD también destacó que Trends.Earth ha ayudado considerablemente al proceso de rendición de informes, permitiéndole a los países Partes adaptar el producto por defecto a las fronteras oficiales de los países, por lo que les permite aprovechar los productos generados a nivel nacional mientras mantienen su alineación con el marco metodológico propuesto sugerido por NDT-TSP (CNULD, 2018). El uso de Trends.Earth mejoró la búsqueda de la armonización metodológica sobre la evaluación y combinación de los subindicadores hacia el Indicador ODS 15.3.1, y al mismo tiempo mejoró el potencial de apropiación por los países del seguimiento y análisis de los datos. En noviembre de 2018 se lanzó la Iniciativa del Grupo de Observaciones de la Tierra sobre Neutralidad de la degradación de la tierra (GEO LDN) con la misión de “promover el desarrollo colaborativo y apoyar el suministro y uso de productos de observaciones de la tierra (EO), normas de calidad, herramientas de análisis y desarrollo de capacidades para evitar, reducir y revertir la degradación de la tierra con el objetivo de lograr la NDT en todos los países para 2030. La iniciativa ayudará a conectar a los proveedores de datos con los usuarios de datos, entre

investigadores, tomadores de decisiones, planificadores del uso del suelo, el sector comercial, los donantes/inversionistas y otras partes interesadas, con el fin de optimizar el uso de los productos EO para la evaluación, planificación, ejecución, monitoreo y presentación de informes sobre la NDT” (GEO LDN, 2020b). La GEO LDN se organiza en tres grupos de trabajo: uno sobre el desarrollo de capacidades, uno sobre normas de calidad de los datos y un tercero sobre el análisis de datos. Conservación Internacional y el equipo de Trends.Earth participan activamente en la iniciativa GEO LDN con el fin de asegurar una alineación entre los datos del país y las necesidades de procesamiento y el desarrollo técnico en la herramienta.

© Benjamin Drummond

Productos globales disponibles actualmente en Trends.Earth

Actualmente, Trends.Earth mantiene productos geospaciales de moderados a gruesos que representan cada uno de los subindicadores necesarios para calcular el ODS 15.3.1 (Cuadro 1).

los productos de la Iniciativa de Cambio Climático (CCI) de la Agencia Espacial Europea (ESA); y para estimar los cambios en las existencias de carbono, la capa SoilGrids que representa carbono orgánico del suelo (COS) se combina con la cobertura de la tierra ESA CCI, lo que representa coeficientes de conversión de carbono para cambios en el uso de la tierra (Trends.Earth, 2020). En la siguiente sección se presenta una revisión de los productos actualmente disponibles para considerar su inclusión en Trends.Earth en apoyo de las evaluaciones de la degradación del suelo a una resolución espacial más fina.

Para los cambios en la productividad de la tierra, los usuarios tienen la opción de aplicar ya sea el producto del Sistema de Monitoreo y Modelado de Inventario Global (GIMMS) con Radiómetro Avanzado de Muy Alta Resolución (AVHRR) o del Espectrorradiómetro de Imágenes de Resolución Moderada (MODIS) 13Q1, que ambos representan NDVI; los cambios en la cobertura de la tierra se estiman utilizando

Cuadro 1 – Productos geospaciales que representan los subindicadores necesarios para estimar ODS 15.3.1 que actualmente mantiene Trends.Earth.

Subindicador	Nombre	Fuente	Resolución espacial	Cobertura temporal	Frecuencia temporal	Extensión
Productividad de la tierra	NASA/USGS MODIS Terra MOD13Q1 v006 (Colección 6) NDVI	NASA-USGS	250 m	18 de febrero de 2000 - presente	Combinación de 16 días	Global
	NASA AVHRR GIMMS 3g.v0 NDVI	NASA – GIMMS 3g.v0	8 km	Julio 1981 – Diciembre 2015	Mensual	Global
Cobertura de la tierra	Cobertura de la tierra ESA CCI	ESA-CCI	300 m	1992-2018	Anualmente	Global
Existencias de carbono	SoilGrids	ISRIC	250 m	2010	NA	Global



© Pete Oxford/iLCP

Medición de los cambios en la productividad de la tierra

La productividad de la tierra es la capacidad productiva biológica de la tierra, que es la fuente de toda la comida, fibra y el combustible de los que dependen las comunidades (Sims et al., 2017).

Generalmente, la productividad de la tierra se evalúa mediante métodos diseñados para estimar la cantidad de biomasa producida por un área dada durante un período fijo. La productividad primaria neta (PPN), la cantidad neta de carbono asimilado por la vegetación luego de la fotosíntesis y la respiración autótrofa durante un período determinado de tiempo (Clark et al. 2001), se usa normalmente para estimar productividad de la tierra en grandes extensiones, y típicamente se representa en unidades tales como kg/ha/año. La PPN es una variable ecológica fundamental, dada su importancia al descubrir la condición de la tierra con vegetación y el estado de los procesos ecológicos, los servicios de los ecosistemas y el bienestar humano. La teledetección es la forma más eficaz para estimar variables biofísicas de productividad de la tierra a escalas diferentes por medio de las correlaciones conocidas entre la fracción de radiación fotosintéticamente activa absorbida y el crecimiento de las plantas, el vigor y la biomasa (Yengoh et al., 2016). Los índices de vegetación (IV) derivados de las imágenes por satélite con sustitutos conocidos empleados para estimar la PPN, ya que miden la cantidad de vegetación fotosintéticamente activa en determinados puntos en el tiempo y, a través de su integración a través de la estación de crecimiento, pueden utilizarse para estimar la productividad primaria neta anual (PPNA).

convierten en moléculas de azúcar a través de la fotosíntesis (Odum, 1968). La PPB se puede medir sobre el terreno al modelar la ganancia de biomasa y la tasa de respiración - intercambio neto de CO₂ medido por medio de las técnicas de covarianza de Foucault (también conocida como covarianza de eddy, CE). Sin embargo, las mediciones de trabajo de campo con CE tienen una huella espacial muy estricta que depende de la altura de la torre de CE, las características físicas del dosel y la velocidad del viento (Wu et al., 2010). La observación directa de la PPB no está disponible a escala global. Al evaluar la PPB sobre grandes extensiones, las técnicas de sensores remotos o teledetección ofrecen un enfoque más rentable a través de observaciones coherentes y sistemáticas de las interacciones biofísicas entre vegetación y luz. El modelo de eficiencia en el uso de la luz (EUL: Monteith, 1977, 1972) - Ecuación 1 - supone ser el enfoque más adecuado para predecir variaciones espaciales y temporales en la PPB (Wu et al., 2010). Las unidades de PPB se reportan normalmente como flujo de energía (j m⁻²day⁻¹) o como masa por área (t ha⁻¹).

$$GPP = EUL * fRFAA * RFA \quad (1)$$

donde la EUL es la eficiencia en el uso de la luz y *fRFAA* es la fracción de la radiación fotosintéticamente activa (RFA) absorbida.

Conclusión de la revisión de los datos: Existen productos globales espacialmente explícitos sobre PPB a una resolución espacial relativamente gruesa (Cuadro 2). Sin embargo, los productos de teledetección para PPB se derivan normalmente del modelo de EUL; por lo tanto, sus estimaciones son objeto de gran incertidumbre dada su relación directa con la tasa de EUL, que deben ser calibradas rigurosamente a través de la diversidad de tipos de vegetación en el tiempo. Consiguientemente, se requiere de mediciones meteorológicas en tierra (Wu et al., 2010). Teniendo en cuenta la resolución espacial gruesa y la incertidumbre asociada con el modelado de la PPB, los productos sobre PPB actualmente disponibles en Trends.Earth no son adecuados para respaldar la estimación de los cambios en el indicador de productividad de la tierra

Productividad primaria bruta - PPB

La productividad primaria bruta (PPB) calcula la proporción de la energía incidente que es asimilada por organismos autótrofos, lo que resulta directamente en la tasa de fijación de carbono a través del proceso de fotosíntesis. La estimación de la PPB es fundamental para entender la eficiencia de asimilación a la que los productores primarios capturan la energía electromagnética incidente del sol y la

Cuadro 2 – Productos geospaciales globales disponibles públicamente que modelan la Productividad Primaria Bruta con base en los datos obtenidos por sensores remotos.

Nombre	Fuente	Resolución espacial	Resolución espectral	Cobertura temporal	Resolución temporal	¿Listo para análisis?	Extensión
PML_V2: Acopla la evapotranspiración y el producción primaria bruta	Penman-Monteith-Leuning (PML)	500 m	5 bandas que representan productos derivados: Producción primaria bruta (PPB); transpiración de la vegetación (Ec); evaporación del suelo (Es); interceptación por el dosel (Ei); evaporación de cuerpos de agua, nieve y hielo (ET_agua)	4 de julio de 2002 - 29 de agosto de 2019	8 días	Sí	60 ° S a 90 ° N
MOD17A2H v006: Productividad primaria bruta MODIS/Terra	NASA/USGS LP DAAC	500 m	3 bandas que representan productos derivados: Producción primaria bruta (PPB); fotosíntesis neta (PPB menos respiración de mantenimiento (PsnNet)); bits de control de calidad (Psn_QC)	5 de marzo de 2000 - presente	Combinación de 8 días acumulada	Sí	Global
MOD17A2HGF v006: Productividad primaria bruta MODIS/Terra con relleno de brechas [de datos]	NASA/USGS LPDAAC	500 m	3 bandas que representan productos derivados: Producción primaria bruta (PPB_500m); fotosíntesis neta (PPB menos respiración de mantenimiento (PsnNet_500m)); indicadores de control de calidad (Psn_QC_500m)	1° de enero de 2000 - presente	Combinación de 8 días acumulada	No ³	Global
MYD17A2H v006: Productividad primaria bruta MODIS/Aqua	NASA/USGS LP DAAC	500 m	3 bandas que representan productos derivados: Producción primaria bruta (PPB); fotosíntesis neta (PPB menos respiración de mantenimiento (PsnNet)); bits de control de calidad (Psn_QC)	4 de julio de 2002 - presente	Combinación de 8 días acumulada	Sí	Global
MYD17A2HGF v006: Productividad primaria bruta MODIS/Aqua con relleno de brechas [de datos]	NASA/USGS LPDAAC	500 m	3 bandas que representan productos derivados: Producción primaria bruta (PPB_500m); fotosíntesis neta (PPB menos respiración de mantenimiento (PsnNet_500m)); indicadores de control de calidad (Psn_QC_500m)	1° de enero de 2002 - presente	Combinación de 8 días acumulada	No ³	Global

2 Listo para análisis (Analysis ready) indica que los datos por satélite se han procesado con un conjunto mínimo de requisitos y han sido organizados de manera que permita un análisis inmediato con un mínimo de esfuerzo adicional por parte del usuario, además de una interoperabilidad tanto a través del tiempo como con otros productos.

3 Los productos MODIS de PPB y PPB con relleno de brechas no están disponibles por el momento como datos preparados para su análisis ('datos listos'), dado que se proporcionan en formato HDF escena por escena, lo que requiere que los usuarios dediquen una considerable cantidad de tiempo al preprocesamiento de estos productos.

Productividad primaria neta - PPN

La productividad primaria neta (PPN) se estima con la PPB menos la energía disipada debido al metabolismo y mantenimiento de los organismos autótrofos, lo que representa la tasa real de producción de biomasa que está disponible para el consumo de los organismos heterótrofos (Clark et al., 2001). La PPN como se definió anteriormente no puede evaluarse directamente en el campo debido a las transformaciones tales como la descomposición y el consumo durante el período de medición. Sin embargo, se puede estimar mediante la aplicación de un conjunto de supuestos sobre la base de una serie de mediciones (Clark et al., 2001). La estimación de la PPN a través de sensores remotos es más rentable y permite el análisis espaciotemporal.

Cuadro 3 – Productos geospaciales globales disponibles públicamente que modelan la Productividad Primaria Neta con base en los datos obtenidos por sensores remotos.

Nombre	Fuente	Resolución espacial	Resolución espectral	Cobertura temporal	Frecuencia de las actualizaciones	¿Listo para análisis?	Extensión
MOD17A3H v006: Productividad primaria neta MO-DIS/Terra	NASA/USGS LP DAAC	500 m	2 bandas que representan productos derivados: Producción primaria neta (Ppn_500m); bits de control de calidad (Ppn_QC_500m)	26 de diciembre de 2000 - presente	Anualmente	Sí	Global
MOD17A3HGF v006: Productividad primaria neta MO-DIS/Terra con relleno de brechas [de datos]	NASA/USGS LPDAAC	500 m	2 bandas que representan productos derivados: Producción primaria neta (Ppn_500m); bits de control de calidad (Ppn_QC_500m)	18 de febrero de 2000 - presente	Anualmente	No ⁴	Global
MYD17A3H v006: Productividad primaria neta MO-DIS/Aqua	NASA/USGS LP DAAC	500 m	2 bandas que representan productos derivados: Producción primaria neta (Ppn_500m); bits de control de calidad (Ppn_QC_500m)	27 de diciembre de 2002 - presente	Anualmente	Sí	Global
MYD17A3HGF v006: Productividad primaria neta MO-DIS/Aqua con relleno de brechas [de datos]	NASA/USGS LPDAAC	500 m	2 bandas que representan productos derivados: Producción primaria neta (Ppn_500m); bits de control de calidad (Ppn_QC_500m)	4 de julio de 2002 - presente	Anualmente	No ⁴	Global

4 Los productos MODIS GPP y NPP armonizados no están actualmente disponibles como datos listos para análisis ya que son provistos por escena en formato HDF, lo que requiere que los usuarios dediquen tiempo considerable para pre-procesar los datos.



Conclusiones sobre la revisión de datos sobre PPB y PPN:

El modelado de la PPN con base en productos geospaciales globales provenientes de sensores remotos poseen una resolución espacial gruesa (Cuadro 3). Ya que la observación directa global de la PPN no está disponible y la estimación de la PPN a través de imágenes por satélite implica considerables incertidumbres dada el número de supuestos y variables que necesitan ser calibradas en relación con la variación espacio-temporal de la vegetación (es decir, tipo y fenología), los efectos atmosféricos, la temperatura y el equilibrio hídrico (Fensholt et al., 2006; Shabanov et al., 2015). Dada la necesidad, identificada por los tomadores de decisiones y expertos geospaciales, de apoyar los datos con resolución espacial más fina (más fina que la resolución actual de 250 m de los datos globales) y las limitaciones de disponibilidad de los productos sobre PPB y PPN actualmente disponibles, no parece conveniente incluir estos últimos en Trends.Earth como parte del ciclo de actualización actual. Los índices de vegetación pueden superar varias de estas limitaciones; por ello, el desarrollo ulterior explorará la inclusión de datos de sensores remotos más finos y una serie de índices de vegetación, a fin de proporcionar opciones adecuadas para la evaluación de la productividad bajo diferentes condiciones locales (véase las secciones siguientes para su revisión y conclusiones).

Índices de vegetación derivados de sensores remotos (teledetección)

La medición de la productividad de la tierra es esencial para entender mejor la dinámica de la vegetación y para evaluar y monitorear sus respuestas a las perturbaciones naturales y las provocadas por el hombre. Las mediciones basadas en la observación de la productividad primaria proporcionan resultados que reflejan de manera más realista los procesos biofísicos de acumulación de biomasa del suelo por unidad de tiempo y área, que son útiles para la toma de decisiones, tales como informar sobre la disponibilidad de forraje en pastizales. Sin embargo, las estimaciones objetivas de la productividad de la tierra se limitan a pequeñas extensiones y por lo tanto no son aplicables para las evaluaciones globales sobre degradación de la tierra. Los productos espacialmente explícitos que representan la PPB y PPN se basan en modelos que toman en cuenta diferentes variables y supuestos. Dada la complejidad para conseguir los parámetros necesarios para modelar la productividad primaria bruta (PPB) y la productividad

primaria neta (PPN) y sus incertidumbres inherentes (Anav et al., 2015; Tucker and Pinzon, 2017), generalmente se aplican sustitutos de la actividad fotosintética, como los índices de vegetación derivados de la teledetección, en la estimación de la productividad de la tierra sobre escalas de regionales a nacionales.

Los índices de vegetación (IV) son variables sustitutivas que se utilizan ampliamente para estimar la productividad de la tierra. Los IV se basan en la interacción biofísica bien documentada entre los productores primarios y longitudes de onda estrechas del espectro electromagnético (Gao et al., 2020; Gausman, 1974; Huete, 1988; Jiang et al., 2008; Kong et al., 2019; LeVine and Crews, 2019; Qi et al., 1994; Tucker, 1979; Yengoh et al., 2016). Las clorofilas son responsables de tasas de absorción importantes en la parte visible del espectro (400 a 680 nm), mientras que las células del mesófilo de empalizada representan el considerable aumento en las tasas de reflectancia en el infrarrojo cercano (700-1,300 nm: Gausman, 1974; Tucker, 1979). Diferentes sensores de observación de la tierra cuentan con resolución espectral que cubre dichas longitudes de onda (por ejemplo: Sentinel 2 MSI, Landsat 5 TM/7 ETM+/8OLI, CBERS 2/2B/4/4A, MODIS Aqua/Terra, AVHRR). Los VI se utilizan comúnmente como una forma confiable de evaluar el estado de la cobertura vegetal, la capacidad fotosintética y la estructura de la vegetación, entre otras variables (Yengoh et al., 2016). Por otra parte, los IV puede derivarse fácilmente a partir de las imágenes que cubren grandes extensiones y de largas series temporales, y se puede utilizar como uno de los indicadores para mapear y monitorear la degradación de la tierra (Cowie et al., 2018; Sims et al., 2019). El NDVI es el IV más ampliamente utilizado dada la simplicidad de su cálculo, facilidad de interpretación y amplio rango de aplicación; sin embargo, se han identificado algunas limitaciones. A continuación ofrecemos una revisión de los IV de banda ancha comúnmente empleados que pueden derivarse de la mayoría de las imágenes por satélite actualmente a disposición del público y que se producen de manera rutinaria o se aplican a nivel global, lo que podría considerarse para su inclusión en Trends.Earth a fin de apoyar las evaluaciones de la degradación de la tierra a escala nacional y subnacional. Los IV incluidos en este informe fueron seleccionados sobre la base de una revisión exhaustiva por pares de artículos científicos e informes técnicos especializados y sobre la base de recomendaciones de los expertos y los socios del proyecto Tools4LDN.

a. Índice de Diferencia de Vegetación Normalizado - NDVI

El Índice de Diferencia de Vegetación Normalizado (NDVI: Tucker, 1979) se basa en las longitudes de onda del rojo (~ 680 nm) y del infrarrojo cercano (~ 860 nm), y se define como la razón de la diferencia entre la banda del infrarrojo cercano (IRC) y la banda del rojo sobre la suma de estas dos bandas.

$$NDVI = \frac{(IRC - Rojo)}{(IRC + Rojo)} \quad (2)$$

donde IRC es la reflectancia medida en la banda del infrarrojo cercano, y Rojo es la reflectancia medida en la banda del rojo. Los valores de NDVI varían de -1 a 1; las áreas con vegetación normalmente dan valores $\geq 0,2$.

El NDVI es una de las variables sustitutivas basada en sensores remotos que primero se propusieron para evaluar la actividad fotosintética potencial, y es el índice de vegetación más usado en todo el mundo. Dada su ecuación más sencilla comparada con la de otros IV más sofisticados, se puede calcular utilizando la mayoría de las imágenes por satélite disponibles en la actualidad. El NDVI ha sido ampliamente implementado en prácticamente todas las regiones del mundo, dado que funciona relativamente bien en la mayoría de las áreas (Tucker and Pinzon, 2017; Tucker, 1979; Yengoh et al., 2016). Sin embargo, varios estudios afirman que NDVI tiende a saturar en zonas con vegetación densa, donde se reduce la reflectancia de la banda del Rojo y la razón IRC/Rojo se aproxima asintóticamente a 1. Además, la respuesta del NDVI varía con la geometría de visualización y la reflectancia del sustrato (Jiang et al., 2008; Neinavaz et al., 2020; Yengoh et al., 2016), y es sensible a las influencias del brillo del suelo (Huete, 1998).

b. Índice de Vegetación Mejorado - EVI

Índice de Vegetación Mejorado (EVI por sus siglas en inglés: Liu et al., 1995) es un índice de vegetación que explora más allá la relación entre las bandas del infrarrojo cercano (~ 860 nm) y del rojo (~ 680 nm) y añade la banda del azul (~ 465 nm).

$$EVI = G * \frac{(IRC - Rojo)}{(IRC + C_1 * Rojo - C_2 * Azul + L)} \quad (3)$$

donde IRC es la reflectancia medida en la banda del infrarrojo cercano, Rojo es el reflectancia medida en la banda del rojo, Azul es la reflectancia medida en la banda del azul, G es un factor de ganancia, L es una variable de ajuste para el dosel y las señales de fondo del suelo, y C1 y C2 son coeficientes derivados mediante la banda del azul para corregir la sensibilidad de la banda del rojo a la dispersión por aerosoles.

El EVI fue desarrollado para mejorar la sensibilidad a los bosques tropicales de densa vegetación que se caracterizan por una alta biomasa y donde el NDVI tiende a saturar, y para corregir los ruidos derivados del trayecto aditivo atmosférico y el fondo del dosel. Sin embargo, el EVI ha demostrado ser relativamente ineficiente en la evaluación global de la vegetación. Eso se debe a que sus coeficientes C1 y C2 fueron desarrollados para la evaluación de la vegetación a través de las latitudes templadas, lo que mandan estimaciones sesgadas desde las regiones no templadas del mundo (Jiang et al., 2008; Yengoh et al., 2016). Además, el EVI utiliza la banda Azul (~ 465 nm), lo que limita su consistencia a través de diferentes sensores (Jiang et al., 2008) lo que hace que sea muy sensible a los efectos de dispersión de Raleigh, disminuyendo su eficacia debido a problemas con nubes subpíxel, aerosoles y superficies cubiertas de nieve (Tucker y Pinzon, 2017).

c. Índice de Vegetación Mejorado 2 - EVI2

El Índice de Vegetación Mejorado 2 - (EVI2 por sus siglas en inglés: Jiang et al., 2008) es una reformulación del EVI que elimina el uso de la banda Azul (~ 465 nm) debido a su característica sensibilidad a los aerosoles atmosféricos.

$$EVI2 = 2.5 * \frac{(IRC - Rojo)}{(IRC + 2,4 * Rojo + 1)} \quad (4)$$

donde IRC es la reflectancia medida en la banda del infrarrojo cercano, y Rojo es la reflectancia medida en la banda del rojo.

Yengoh et al. (2016) afirma que EVI2 es muy similar a NDVI, argumentando que NDVI es más sensible a la producción primaria y que EVI2 es más sensible a los doseles con vegetación muy densa. Una comparación entre NDVI e EVI2 con fluorescencia de la clorofila inducida por el sol, que es una observación más estrechamente relacionada con la actividad fotosintética, Tucker y Pinzon (2017) encontraron que el EVI2 sobrepasa al NDVI como variable sustitutiva para la fotosíntesis potencial. La NASA está implementando EVI2 como el nuevo producto IV estándar para el paquete de Radiómetro de Imágenes en el Infrarrojo Visible (VIIRS), que se espera extienda la vida útil de los productos IV similares a los que se generan a partir de imágenes MODIS. Sin embargo, el EVI2 es sensible a la cobertura de nieve, por lo que esta superficie debe tenerse en cuenta en las latitudes medias y altas (Moon et al, 2019; Zhang et al., 2020).

d. Índice de Vegetación Ajustado al Suelo - SAVI

El Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI por sus siglas en inglés: Huete, 1988) fue desarrollado para dar cuenta de las influencias de factores externos a la estructura de la vegetación, tales como variaciones de fondo del suelo (Huete, 1988).

$$SAVI = \frac{(IRC - Rojo)}{(IRC + 2.4 * Rojo + L)} * (1 + L) \quad (5)$$

donde IRC es la reflectancia medida en la banda del infrarrojo cercano, Rojo es la reflectancia medida en la banda del rojo, y el factor L es una variable que da cuenta de los ajustes del suelo. En general, se recomienda que L sea igual a 1 en las zonas que muestran vegetación verde baja, e igual a 0 en las zonas con vegetación verde alta, en cuyo caso SAVI es equivalente a NDVI.

Se recomienda SAVI para regiones áridas con vegetación escasa, dado que el factor de ajuste de suelo L se introdujo con el objetivo de minimizar la influencia del brillo de fondo del suelo debido al color del suelo, su humedad y variabilidad. No obstante, tener que hacer ajustes para la influencia de fondo del suelo hace que SAVI sea menos sensible a la cobertura y variabilidad de la vegetación (Jiang et al., 2008) y más sensible a los artefactos atmosféricos. Por otra parte, el factor de ajuste del suelo necesita ser determinado empíricamente (Gilabert et al., 2002).

e. Índice de Vegetación Ajustado al Suelo Modificado – MSAVI

El Índice de Vegetación Ajustado al Suelo Modificado (MSAVI por sus siglas en inglés: Qi et al., 1994) es una versión modificada del Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI) que sustituye la variable L de ajuste del suelo por un factor de ajuste automático L, a pesar de que este factor no es explícito dentro de la ecuación.

$$MSAVI = \frac{2 * IRC + 1 - \sqrt{(2 * IRC + 1)^2 - 8 * (IRC - Rojo)}}{2} \quad (6)$$

donde IRC es la reflectancia medida en la banda del infrarrojo cercano y Rojo es la reflectancia medida en la banda del rojo.

MSAVI fue desarrollado para aumentar la señal de la vegetación y disminuir las variaciones externas inducidas por el suelo, especialmente en zonas con un alto grado de suelos desnudos expuestos. Jiang et al. (2007) encontraron que MSAVI reduce las influencias de fondo del suelo y que los valores estimados con MSAVI son estrechamente aproximados a los valores biofísicos del dosel medidos en terreno y modelados a través de diferentes estructuras de dosel y una amplia gama de fracciones de vegetación, Índice de área foliar (IAF), y condiciones del suelo, concluyendo que MSAVI es un IV robusto para tierras con escasa vegetación.

f. Índice de Vegetación Total Ajustado al Suelo – SATVI

El Índice de Vegetación Total Ajustado al Suelo (SATVI por sus siglas en inglés: Marsett et al., 2006) es un índice de vegetación diseñado para ser aplicado sobre zonas de pastizales, dada su sensibilidad a las fracciones de vegetación verde y senescentes.

$$SATVI = \frac{IROC1 - Rojo}{IROC1 + Rojo + L} * (1 + L) - \frac{IROC2}{2} \quad (7)$$

donde IROC1 es la reflectancia medida en la banda infrarroja de onda corta # 1 (~ 1660 nm), Rojo es la reflectancia medida en la banda del rojo (~ 680 nm), IROC2 es la reflectancia medida en la banda infrarroja de onda corta # 2 (~ 2250 nm), y L es una constante relacionada con la pendiente de la línea del suelo en una parcela característica.

A diferencia de otros IV, SATVI tiene un límite inferior igual a 0,0 con un límite superior indeterminado. SATVI fue desarrollado para su aplicación en pastizales compuestos en su mayoría de gramíneas; su aplicabilidad a través de áreas que ofrecen combinaciones de gramíneas con arbustos y árboles todavía debe seguirse estudiando (Marsett et al., 2006). SATVI también es sensible a los afloramientos rocosos o farellones que tienen alta reflectancia en la banda infrarroja de onda corta, y muestra este tipo de superficies como vegetación, lo que potencialmente limita sus aplicaciones.

g. Índice de Fenología Vegetal - PPI

El Índice de Fenología Vegetal (PPI por sus siglas en inglés: Jin and Eklundh, 2014) es un índice de vegetación de base física que se propuso para mejorar el monitoreo de la fenología de las plantas, y proporciona un enfoque operativo y eficiente para sacar datos de crecimiento del dosel.

$$PPI = -K * \ln \left(\frac{M - DVI}{M - DVI_s} \right) \quad (8)$$

donde K es un factor de ganancia que se estima a partir de 1/k (k es el coeficiente de extinción de la luz por unidad del IAF); DVI (por sus siglas en inglés) es el Índice de Diferencia de Vegetación (DVI = IRC - Rojo); DVI_s es el DVI de fondo del suelo; y M es un DVI máximo del dosel específico para el sitio. El DVI se calcula a partir de la reflectancia Roja e IRC corregida por la geometría sol-sensor, como las implementadas en productos ajustados por BRDF como MODIS/MCD43.

Se ha demostrado que el PPI funciona bien para el monitoreo de bosques de hojas perennes aciculares sobre suelos de fondo brillante, tales como la nieve en los bosques boreales del norte. A diferencia del NDVI e EVI, el PPI es menos sensible a las influencias de los fondos de nieve. El PPI se basa también en las longitudes de onda del Rojo y del infrarrojo cercano (IRC) y tiene una fuerte correlación con el índice de área foliar (IAF) verde del dosel. Requiere de imágenes de reflectancia estandarizadas de alta calidad como insumo, lo que puede ser un inconveniente cuando se trata de ponerlo en práctica a nivel mundial.

Dada la complejidad de la ecuación y el número de insumos estandarizados que se requiere, el PPI no parece ser un índice de vegetación factible que pueda implementarse fácilmente. Por otra parte, como destacaron los autores, el PPI fue diseñado específicamente para su aplicación en bosques perennifolios aciculares (como coníferas), que son más comunes en las latitudes altas del hemisferio norte (Jin and Eklundh, 2014).

Los cuadros 4 y 5 a continuación proporcionan una revisión de los IV fácilmente disponibles y de uso común derivados por medio de sensores multiespectrales banda ancha en escalas de regionales a mundiales.



Cuadro 4 – Resumen de los Índices de Vegetación (IV) revisados.

Índice de vegetación	Bandas espectrales requeridas para calcular el IV	Parámetros requeridos	Pros	Contras
NDVI	Rojo (~ 680 nm) e infrarrojo cercano (IRC: ~860 nm)	Ninguno	Ecuación simple; fácil de calcular; IV más utilizado; funciona relativamente bien en la mayoría de las áreas, ampliamente utilizado.	Se satura en zonas de biomasa alta; sensibilidad a la influencia de los fondos de suelo, estructuras de vegetación no fotosintética; depende de la geometría de visualización
EVI	Azul (~ 465nm), Rojo (~680 nm) e infrarrojo cercano (IRC: ~860 nm)	Factor de ganancia (G), variable de ajuste para influencia de fondo (L); coeficientes de ajuste para la dispersión por aerosol (C1 y C2)	Mejora de la respuesta a las zonas de biomasa altas; da cuenta de las influencias de la atmósfera y del fondo	Los coeficientes de ajuste para la dispersión por aerosol (C1 y C2) son específicos para las regiones; alta sensibilidad de la banda del azul (~ 465 nm) a la dispersión de Raleigh.
EVI2	Rojo (~ 680 nm) e infrarrojo cercano (IRC: ~860 nm)	Ninguno	Mejora de la respuesta a las áreas con dosel de vegetación densa; ecuación simple; no utiliza la banda del azul (~ 465 nm)	La sensibilidad a la cubierta de nieve en latitudes medias y altas.
SAVI	Rojo (~ 680 nm) e infrarrojo cercano (IRC: ~860 nm)	Variable de ajuste para la influencia de fondo (factor L)	Mejor respuesta a las áreas con escasa vegetación	Menor respuesta a la cobertura de vegetación y la variabilidad; sensibilidad a los artefactos atmosféricos; el factor L se determina empíricamente
MSAVI	Rojo (~ 680 nm) e infrarrojo cercano (IRC: ~860 nm)	Ninguno	Baja sensibilidad al fondo del suelo; mejor respuesta a las áreas con escasa vegetación; alta correlación con las mediciones de campo sobre estructuras variables del dosel, el IAF y las condiciones del suelo	Ecuación relativamente compleja
SATVI	Rojo (~ 680 nm) e infrarrojo de onda corta (IROC: ~ 1660 nm) e infrarrojos de onda corta #2 (IROC2: ~ 2250 nm)	Constante para tener en cuenta la pendiente de la pendiente de la línea del suelo en una parcela característica (L)	Mejor respuesta a las áreas con escasa vegetación; alta correlación con las mediciones de campo sobre estructuras variables del dosel, el IAF y las condiciones del suelo	La sensibilidad a los afloramientos rocosos; no ha sido plenamente probado en áreas que muestran una mezcla de gramíneas, arbustos y bosques
PPI	Rojo (~ 680 nm) e infrarrojo cercano (IRC: ~860 nm)	Factor de ganancia (K) derivado de 1/k (k es el coeficiente de extinción de la luz por unidad de IAF); Índice de Diferencia de Vegetación (DVI) máximo del dosel específico para el sitio.	Mejor respuesta de los bosques boreales; menor sensibilidad a la nieve; fuerte correlación con el índice de área foliar (IAF)	Ecuación compleja; alto nivel de parametrización;

Cuadro 5 – Productos geospaciales globales fácilmente disponibles al público que representan Índices de Vegetación (IV).

Nombre	Fuente	IV	Resolución espacial	Cobertura temporal	Frecuencia	¿Listo para análisis?	Extensión
EVI compuesto 32 días Landsat 8	NASA-USGS-GEE	EVI	30 m	7 de abril de 2013 – 9 de mayo de 2017	Combinación de 32 días	Sí	Global
EVI compuesto 8 días Landsat 8	NASA-USGS-GEE	EVI	30 m	1º de enero de 2013 – 1º de enero de 2018	Combinación de 8 días	Sí	Global
EVI compuesto anual Landsat 8	NASA-USGS-GEE	EVI	30 m	1º de enero de 2013 – 1º de enero de 2018	Anualmente	Sí	Global
NDVI compuesto 32 días Landsat 8	NASA-USGS-GEE	NDVI	30 m	7 de abril de 2013 – 9 de mayo de 2017	Combinación de 32 días	Sí	Global
NDVI compuesto 8 días Landsat 8	NASA-USGS-GEE	NDVI	30 m	7 de abril de 2013 – 9 de mayo de 2017	Combinación de 8 días	Sí	Global
NDVI compuesto anual Landsat 8	NASA-USGS-GEE	NDVI	30 m	7 de abril de 2013 – 9 de mayo de 2017	Combinación de 32 días	Sí	Global
EVI compuesto 32 días Landsat 5	NASA-USGS-GEE	EVI	30 m	1º de enero de 1984 – 8 de mayo de 2012	Combinación de 32 días	Sí	Global
EVI compuesto 8 días Landsat 5	NASA-USGS-GEE	EVI	30 m	1º de enero de 1984 – 8 de mayo de 2012	Combinación de 8 días	Sí	Global
EVI compuesto anual Landsat 5	NASA-USGS-GEE	EVI	30 m	1º de enero de 1984 – 8 de mayo de 2013	Anualmente	Sí	Global
NDVI compuesto 8 días Landsat 5	NASA-USGS-GEE	NDVI	30m	1º de enero de 1984 – 8 de mayo de 2012	Combinación de 8 días	Sí	Global
NDVI compuesto 32 días Landsat 5	NASA-USGS-GEE	NDVI	30m	1º de enero de 1984 – 8 de mayo de 2012	Combinación de 8 días	Sí	Global
NDVI compuesto anual Landsat 5	NASA-USGS-GEE	NDVI	30m	1º de enero de 1984 – 8 de mayo de 2012	Combinación de 8 días	Sí	Global
NASA/USGS MODIS Terra MOD13Q1 v006 (Colección 6)	NASA-USGS	NDVI y EVI	250 m	18 de febrero de 2000 – presente	Combinación de 16 días	Sí	Global
NASA/USGS MODIS Terra MOD13A1 v006 (Colección 6)	NASA-USGS	NDVI y EVI	500 m	18 de febrero de 2000 – presente	Combinación de 16 días	Sí	Global
NASA/USGS MODIS Terra MOD13A2 v006 (Colección 6)	NASA-USGS	NDVI y EVI	1 km	18 de febrero de 2000 – presente	Combinación de 16 días		
NASA/USGS MODIS Aqua MYD13Q1 v006 (Colección 6))	NASA-USGS	NDVI y EVI	250 m	4 de julio de 2002 - presente	Combinación de 16 días	Sí	Global
NASA/USGS MODIS Aqua MYD13A1 v006 (Colección 6)	NASA-USGS	NDVI y EVI	500 m	4 de julio de 2002 - presente	Combinación de 16 días	Sí	Global
NASA/USGS MODIS Aqua MYD13A2 v006 (Colección 6)	NASA-USGS	NDVI y EVI	1 km	4 de julio de 2002 – presente	Combinación de 16 días	Sí	Global
NASA VIIRS índices de vegetación de 16 días 500 -EVI, EVI2, NDVI (VNP13A1)	NASA-USGS	NDVI; EVI y EVI2	500 m	17 de enero de 2012 – presente	Combinación de 16 días	Sí	Global
NASA AHVRR sistemas globales de monitoreo de inventarios y modelado (GIMMS) 3g.v1	NASA – GIMMS 3g.v1	NDVI	8 km	1 de julio de 1981 – 31 de diciembre de 2015	Mensual	Sí	Global

Conclusiones sobre la revisión de los índices de vegetación:

Hasta la fecha, los marcos globales de monitoreo de la degradación del suelo han confiado en los productos de NDVI derivados de imágenes con resolución espacial de moderada a gruesa - 250 m (MOD13Q1) a 8 km (AVHRR GIMMS), ya que el NDVI ha sido una de las variables sustitutivas más consistentemente empleadas para evaluar la salud de la vegetación a nivel mundial, dada su facilidad de implementación y popularidad (Yengoh et al., 2016). Por ejemplo: el producto sobre productividad de la tierra generado por Trends.Earth y el producto de Dinámica de la Productividad de la Tierra (DPT) generado por el Centro Común de Investigación de la Comisión Europea (Ivits y Cherlet 2016) se derivan del NDVI con empleo de resolución moderada. Actualmente existen productos fácilmente disponibles derivados de Landsat 5TM y Landsat 8OLI que brindan productos de NDVI e EVI a una relativamente alta resolución espacial (Cuadro 5). Sin embargo, varios estudios afirman que el NDVI tiende a alcanzar asintóticamente una meseta con respecto de las tierras de biomasa alta, y la versión del EVI a 3 bandas no parece ser confiable para su aplicación a nivel mundial dado su uso de la banda Azul (Sims et al., 2017; Tucker and Pinzon, 2017; Tucker and Pinzon, 2017). Existe otra limitación de éstos IV comúnmente usados, y es su capacidad de lidiar con las influencias de fondo del suelo en zonas con escasa vegetación (Huete, 1988; Qi et al., 1994).

El NDVI es sin duda el IV más utilizado dadas las múltiples ventajas anteriormente descritas. Sin embargo, para lugares específicos con la biomasa en ambos extremos del espectro, ya sea o muy alta o muy baja, otros índices de vegetación podrían proporcionar una mejor sensibilidad para medir la productividad de la tierra, y como tal podrían ser útiles para evaluar los cambios en la degradación de la tierra. Teniendo esto en cuenta, se recomienda la aplicación de otros dos IV a Trends.Earth, lo que proporcionaría a los usuarios más opciones a la hora de realizar evaluaciones de la degradación de la tierra: el Índice de Vegetación Mejorado a dos bandas (EVI2) y el Índice de Vegetación Ajustado al Suelo Modificado (MSAVI). El EVI2 es particularmente útil para los usuarios que analizan tierras que presentan una alta biomasa, dado que no tiende a saturarse en áreas de densa vegetación. El MSAVI ha demostrado ser un IV robusto para tierras con escasa vegetación, y será útil en terrenos que presentan gran influencia de fondo del suelo, condiciones

como las que presentan las tierras degradadas en necesidad de restauración. Además de añadir índices de vegetación más adecuados para áreas específicas, se debe incluir en el manual del usuario de Trends.Earth una orientación clara sobre cuando alguno de los indicadores sería el más adecuado.

Imágenes multiespectrales a disposición del público

Existe una serie de sensores de observación de la tierra diseñados para adquirir datos globales con diferentes características espaciales, temporales y de resolución espectral, lo que permite analizar los cambios en la condición de la tierra como los requeridos para la evaluación de la degradación de la tierra. A continuación, ofrecemos un resumen exhaustivo de las colecciones de imágenes multiespectrales a disposición del público (Cuadro 6). Este cuadro incluye sólo colecciones de imágenes a las que se puede acceder sin ningún tipo de costos directos para el usuario final; la mayor parte de las imágenes en la base de datos ofrecen un alcance global, aunque esta cobertura en todo el mundo no es totalmente consistente a través del tiempo, especialmente para aquellos sensores que se lanzaron antes de 2010. Los países que históricamente han tenido la infraestructura tecnológica (es decir, antenas de enlace descendente para recibir las imágenes, capacidad de almacenamiento y personal altamente capacitado) cuentan con una más extensa colección de imágenes a través del tiempo, mientras que la mayoría de las regiones alrededor del mundo no tiene datos históricos que permitan un análisis anual de series temporales que se remonten a la década de 1980 y 1990, o incluso la de 2000 (Wulder et al., 2016).

Trabajar con imágenes de satélite no es una tarea trivial, pues no solo se trata del volumen de datos pro procesar, sino también el nivel de detalles técnicos involucrados para acceder a ellos, descargarlos, y realizar los ajustes necesarios en cada escena de forma individual. Antes de los avances relativamente recientes en los métodos, tecnología y desarrollo de capacidades, las aplicaciones constructivas y coherentes de las técnicas y productos de la observación de la tierra implicaban desafíos significativos. No hace mucho tiempo, los análisis de los datos de sensores remotos requerían que los usuarios capacitados invirtieran mucho tiempo en el preprocesamiento de los datos, un conjunto de procedimientos técnicos que podía llevar a retrasos e

inconsistencias en los resultados si los usuarios aplicaban diferentes flujos de trabajo o parámetros al preprocesamiento. Esto también podría significar que un número considerable de organizaciones potencialmente interesadas no tendría acceso a la utilidad de los datos de EO debido a sus limitaciones de personal, conocimientos y recursos físicos (es decir, computadoras, capacidad de procesamiento, almacenamiento de datos) para manejar los datos. A fin de superar estos costosos pasos de preprocesamiento, existe el requerimiento de los usuarios finales y las principales organizaciones interesadas de que los datos geoespaciales tengan acceso a datos listos para su análisis (DLA).

El Comité sobre Satélites de Observación de la Tierra (CEOS) define DLA como «los datos por satélite se han procesado con un conjunto mínimo de requisitos y han sido organizados de manera que permita un análisis inmediato con un mínimo de esfuerzo adicional por parte del usuario, amén de una interoperabilidad tanto a través del tiempo como con otros productos.» El conjunto mínimo de requisitos es: Metadatos generales, calidad de los metadatos, calibración basada en mediciones/radiometría y calibración geométrica. En términos específicos para los sensores ópticos, CEOS también añade corrección Solar, de Ángulo de visión y Atmosférica, amén de corrección Radiométrica para la corrección Topográfica y Radiométrica para el ángulo de incidencia para los sensores activos (CEOS, 2020). No obstante, la definición del concepto de DLA sigue en desarrollo activo, y no todos los proveedores de imágenes entregan productos DLA que cumplan la definición de CEOS. Por ejemplo: el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS) define el DLA de Landsat para EE.UU.

como «paquetes preenvasados y preprocesados de productos de datos Landsat que hacen que el archivo Landsat sea más accesible y más fácil de analizar, reduciendo la cantidad de tiempo que los usuarios pasan en procesamiento de datos para el análisis de series temporales», dado que el DLA de Landsat EE.UU. son productos en mosaico, georegistrados y corregidos a nivel de la atmósfera y la capa superior de la atmósfera (Dwyer et al., 2018). La mayoría de los productos que se muestran en el Cuadro 6 cumplen con la definición de DLA de CEOS; sin embargo algunas de las imágenes no se dan como productos de reflectancia de la superficie.

En cuanto a la continuidad de la disponibilidad de imágenes con resolución espacial media, una alianza entre la NASA y el USGS, conocida como la misión Landsat, está planeando lanzar el satélite Landsat 9 a principios de 2021, el que tendrá una vida útil de 5 años. El Landsat 9 llevará réplicas mejoradas del Sensor Operacional de Imágenes de Tierra (OLI) y del Sensor Térmico de Infrarrojos (STIR) actualmente en órbita alrededor de la tierra a bordo del Landsat 8, y tomará imágenes de la tierra cada 16 días en un desplazamiento de 8 días, aumentando la disponibilidad y resolución temporal de las imágenes con características similares (NASA Landsat 9, 2020). Los sensores de los Instrumentos Multiespectrales (MSI) a bordo de Sentinel-2A y Sentinel-2B fueron diseñados con una misión nominal inicial de 7,5 años con el potencial de extenderla a un máximo de 12 años (ESA Sentinel 2, 2020) y proporcionan imágenes con una resolución espacial media que se espera estén disponibles al menos hasta mediados de la década de 2020 para evaluar los cambios en la superficie de la tierra.



Cuadro 6 – Colecciones globales de imágenes multispectrales disponible públicamente .

Satélite/Sensores	Fuente	Resolución espectral	Resolución espacial	Cobertura temporal	Resolución temporal	¿Listo para análisis?	Extensión
Instrumento Multiespectral (MSI) ESA Sentinel 2 Nivel 1C Reflectancia de la capa superior de la atmósfera (TOA)	ESA/Copernicus	13 bandas Cubre longitudes de onda visibles del IRC-IROC (443–2190 nm)	10 m (bandas Vis-IRC) 20 m (bandas Rojo-Borde e IROC) y 60 m (aerosoles, vapor de agua y bandas de cirros)	23 de junio de 2015 - presente	5 días	No	Global
Instrumento Multiespectral (MSI) ESA Sentinel 2 Nivel 2A Superficie Reflectancia	ESA/Copernicus	13 bandas Cubre longitudes de onda visibles del IRC-IROC (443–2190 nm)	10 m (bandas Vis-IRC) 20 m (bandas Rojo-Borde e IROC) y 60 m (aerosoles, vapor de agua y bandas de cirros)	28 de marzo de 2017 - presente	5 días	Sí	Geografía limitada actualmente. La conversión al SR se produce con base en casos oportunistas.
NASA OLI Landsat 8 armonizado Sentinel-2	NASA Goddard	En función del producto	10 m and 30 m En función del producto	19 de abril de 2013 - presente (OLI Landsat 8) 22 de octubre de 2015 - presente (Sentinel-2)	2 a 3 días	Sí	No - geografía limitada
Satélite de Recursos Terrestres China-Brasil (CBERS) Multiespectral (MUX) y PANMUX 4	INPE – Instituto Nacional de Investigación Espacial del Brasil	4 bandas cubren longitudes de onda visibles del IROC (510-890 nm) (510–890 nm)	5 m (banda pancromática) y 10 m (bandas Vis-IRC)	1º de enero de 2015 – presente	26 días	No	Global
Satélite de Recursos Terrestres China-Brasil (CBERS) Multiespectral (MUX) y PANMUX 4A	INPE – Instituto Nacional de Investigación Espacial del Brasil	4 bandas cubren longitudes de onda visibles del IROC (510–890 nm)	5 m (banda pancromática) y 10 m (bandas Vis-IRC)	27 de diciembre de 2019 – presente	26 días	No	Global
Satélite de Recursos Terrestres China-Brasil (CBERS) Dispositivo de Carga Acoplada (CCD) Multiespectral	INPE – Instituto Nacional de Investigación Espacial del Brasil	5 bandas cubren longitudes de onda visibles del IROC (450–890 nm)	20 m (bandas Vis-IRC)	28 de octubre de 2003 - 1º de octubre de 2009	26 días	No	Global
Satélite de Recursos Terrestres China-Brasil (CBERS) Dispositivo de Carga Acoplada (CCD) Multiespectral y Pancromático (HRC) 2B	INPE – Instituto Nacional de Investigación Espacial del Brasil	5 bandas cubren longitudes de onda visibles del IRC (450–890 nm)	2,7 m (banda Pancromática HRC) y 20 m (bandas Vis-IRC)	9 de septiembre de 2007 - 12 de mayo de 2010	26 días	No	Global
Datos listos para su análisis (DLA) de Landsat GLAD	GLAD - Análisis y descubrimiento terrestre global	7 bandas que cubren las longitudes de onda visible-IRC-IROC-TIR más 1 banda de calidad de la observación	27,83 m	1º de enero de 1997 - presente	16 días	Sí	Global

Satélite/Sensores	Fuente	Resolución espectral	Resolución espacial	Cobertura temporal	Resolución temporal	¿Listo para análisis?	Extensión
Nivel 1 de reflectancia de la superficie por el Sensor Operacional de Imágenes de Tierra (OLI)/Sensor Térmico de Infrarrojos (STIR) en el Landsat 8 del USGS	USGS	11 bandas que cubren las longitudes de onda visible-IRC-IROC-TIR (430–1251 nm)	15 m (banda pancromática); 30 m (bandas Vis-IRC-IROC) y 60 m (bandas STIR)	11 de abril de 2013 - presente	16 días	Sí	Global
Nivel 1 de reflectancia de la superficie por el Trazador temático cartográfico mejorado + (ETM+) en el Landsat 7 del USGS	USGS	8 bandas que cubren las longitudes de onda visible-IRC-IROC-TIR (455–1250 nm)	15 m (banda pancromática); 30 m (Vis-IRC-IROC) y 60 m (banda térmica infrarroja)	1º Julio de 1999 - Presente (para ser dado de baja en 2020)	16 días	Sí	Global
Nivel 1 de reflectancia de la superficie por el Trazador temático cartográfico (TM) en el Landsat 5 del USGS	USGS	8 bandas que cubren las longitudes de onda visible-IRC-IROC-TIR (455–1250 nm)	30 m (Vis-IRC-IROC) y 120 m (banda térmica infrarroja)	1º de enero de 1984 - 5 de mayo de 2012	16 días	Sí	Global
Espectrorradiómetro de Imágenes de Resolución Moderada (MODIS) Terra/Aqua Reflectancia de la superficie diaria global versión 6 (MOD09GQ.006)	NASA	2 bandas que cubren el Rojo (620-670 nm) y el IRC (841-876 nm)	250 m (bandas del Rojo e IRC)	24 de febrero de 2000 – presente	Dos veces al día	Sí	Global
Espectrorradiómetro de Imágenes de Resolución Moderada (MODIS) Terra Reflectancia de la superficie diaria L2G global versión 6 (MOD09GA.006)	NASA	7 bandas que cubren las longitudes de onda visible-IRC-IROC (459–2155 nm)	500 m y 1 km (bandas visible-IRC-IROC)	24 de febrero de 2000 – presente	Dos veces al día	Sí	Global
Radiómetro de Imágenes en el Infrarrojo Visible (VIIRS) Reflectancia de la superficie diaria VNP09GA	NASA	3 bandas que cubren las longitudes de onda del Rojo-IRC-IROC (600-1640 nm) a 500 m	500 m (Rojo-IRC-IROC)	19 de enero de 2012 - presente	Diario	Sí	Global
Radiómetro de Imágenes en el Infrarrojo Visible (VIIRS) Reflectancia de la superficie diaria VNP09GA	NASA	9 bandas que cubren las longitudes de onda visible-IROC-TIR (402–2280 nm) a 1km	1 km (visible-IRC-IROC)	19 de enero de 2012 - presente	Diario	Sí	Global
Radiómetro Avanzado de Muy Alta Resolución (AVHRR) Registro de datos climáticos (CDR) Reflectancia de la superficie Versión 5	NOAA	5 bandas que cubren las longitudes de onda visible-IRC-TIR (640–1200 nm)	5 km (bandas visible-IRC-TIR)	26 de junio de 1981 – presente	Diario	Sí	Global

Conclusiones sobre la revisión de datos de las imágenes:

La evaluación y seguimiento de la degradación del suelo a escala regional y nacional se ha realizado a partir de datos geospaciales derivados de las imágenes con resolución espacial de moderada a gruesa (Bai et al. 2008, 2010; Cherlet et al. 2018). Trends.Earth actualmente ofrece a sus usuarios el acceso a productos con una resolución espacial que va de 250 m a 8 km. Dada la disponibilidad de imágenes globales y de acceso abierto con resoluciones espaciales más finas (es decir, 10-30 m - Cuadro 6), vemos un enorme potencial de estos productos para brindar información al monitoreo de la degradación de la tierra a fin de evaluar el avance hacia la NDT. La incorporación de estos productos mejoraría el detalle espacial de las observaciones, enriqueciendo significativamente la evaluación y el monitoreo de la degradación del suelo a escala local y brindar información para una mejor toma de decisiones. También aumentará el número de países que se beneficiarían de estos análisis, en particular en los pequeños estados insulares. Con base en esta revisión, hoy en día es viable generar el subindicador de productividad de la tierra a nivel mundial, dado que se mide mediante la aplicación de variables sustitutivas de la actividad fotosintética potencial que se puede implementar con base en los índices de vegetación.

Teniendo en cuenta el conjunto de especificaciones técnicas (resoluciones espaciales, temporales, espectrales), además del archivo histórico y los planes para continuar la adquisición de imágenes en el futuro, la familia de sensores Landsat y Sentinel proporciona las mejores colecciones de imágenes para monitorear la degradación de la tierra a escalas finas. Estas no reemplazarían los productos geospaciales con resolución moderada que se han aplicado con éxito para desarrollar las líneas base de degradación de la tierra, sino que serían complementarlos para traer más detalles que solo pueden observarse mediante imágenes con una resolución espacial más fina. Por ejemplo: la NASA y la ESA están desarrollando un conjunto de algoritmos para producir una Constelación Virtual armonizada Landsat y Sentinel-2 de las imágenes de reflectancia de la superficie adquiridas por medio de sensores OLI Landsat 8 y MSI Sentinel-2. Estos productos están diseñados para ofrecer productos sin interrupciones que contarán con corrección atmosférica, enmascaramiento de nubes y de nube-sombra, cuadrículado espacial compartido con co registro, normalización de la geometría de visualización e iluminación y los ajustes de las bandas espectrales (Claverie et al., 2018). El OLI Landsat/Sentinel-2 armonizado brindará una excelente oportunidad para derivar los subindicadores del ODS 15.3.1 dada su resolución espacial relativamente alta (10 - 30 m) combinada con una alta frecuencia de repaos (3 a 4 días) que aumentará significativamente el número de observaciones en cualquier parte del mundo. Sin embargo, es importante tener en cuenta que estos productos no serán útiles para estimar las líneas base de NDT debido a su cobertura temporal limitada, puesto que el MSI Sentinel 2 fue lanzado por primera vez en 2015.



Medición de los cambios en la cobertura de la tierra

La cobertura de la tierra se refiere al material biofísico que compone la superficie de la tierra, dando la cobertura real de una región determinada en clases temáticas (Di Gregorio, 2005; ESA, 2017). Para evaluar los cambios en la cubierta del suelo en el marco de la NDT, es necesario utilizar los mapas de cobertura de la tierra para el período de referencia y los años objetivo.

Por otra parte, idealmente estos mapas tendrían un tamaño de píxeles de 100 m o más fino, una precisión aceptable (> 85%), deberían utilizar una estructura de clases jerárquica, y deberían incluir clases normalizadas específicas para una región que permitan una comparación válida en el tiempo (GEO LDN, 2020a). Teniendo en cuenta que, idealmente, los productos geospaciales que representan las clases de cobertura de la tierra se generarían de forma tal que permita su agrupación en clases temáticas normalizadas (como el Sistema de Contabilidad Ambiental y Económica: SCAE) para su consideración en el proceso de evaluación de la neutralidad de la degradación de la tierra. Los productos geospaciales mostrados en el Cuadro 7 fueron seleccionados porque representan la cobertura de la tierra y los cambios en la cobertura de la tierra a una extensión global. Existen otros productos disponibles al público que proporcionan una resolución espacial más fina para la cobertura de la tierra, pero actualmente solo se brindan de manera consistente en partes limitadas del globo.

Cuadro 7 – Productos geospaciales globales fácilmente disponibles al público que representan la cobertura de la tierra.

Nombre	Fuente	Resolución espacial	Cobertura temporal	Frecuencia de las actualizaciones	Exactitud	¿Listo para análisis?	Extensión
Cobertura de la tierra global a 30m	GlobeLand30	30 m	2000 y 2010	N/A	~80%	No	Global
Copernicus Global Land Service (CGLS)	ESA-Copernicus	100 m	2015	Se planea actualizar los mapas sobre cambios en la cobertura de la tierra cada año	80,2%	Sí	Global
Cobertura de la tierra ESA CCI	ESA-CCI	300 m	1992-2018	Anualmente	73%	Sí	Global
Mapa de cobertura de la tierra global (GlobCover)	ESA	300 m	2009	Solo para 2009	67,5%	Sí	Global
NASA/USGS MODIS Tipo de cobertura de la tierra MCD12Q1 v006	NASA-USGS	500 m	2001-2018	Anualmente	73,6%	Sí	Global
Base de datos SHARE [compartida] de cobertura de la tierra global (GLC)	FAO	1 km	2013	N/A	80,2%	Sí	Global

Conclusiones sobre la revisión de los datos de cobertura de la tierra:

La Agencia Espacial Europea (ESA) lidera el desarrollo de la mayoría de los productos espacialmente explícitos que representan la cobertura de la tierra a escala global. Actualmente, el producto geoespacial de la Iniciativa de Cambio Climático de la ESA (ESA-CCI) que representa la cobertura de la tierra global sigue siendo el conjunto de datos global más adecuado para su aplicación en la evaluación del subindicador de cobertura de la tierra para monitorear la degradación de la tierra, dada su cobertura global, su resolución espacial y el hecho de que se ha actualizado constantemente cada año a través de una larga serie temporales.

El producto de cobertura de la tierra del programa Copérnico (Copernicus Land Cover), también bajo la dirección de la ESA, ha producido un conjunto de datos de cobertura de la tierra que abarca a todo el mundo para el 2015; no obstante, los planes para brindar productos anuales sobre cobertura de la tierra de la misma manera todavía no están claros por el momento. Sin embargo, la ESA también está desarrollando actualmente el proyecto de Cobertura Mundial (WorldCover de ESA, 2020), que busca ofrecer al público un mapa de la cobertura de la tierra de todo el mundo con una resolución

de 10 metros, sobre la base de los datos de Sentinel-1 y 2 con una precisión general del 75%. Mientras que el lanzamiento de este producto global se espera para mediados de 2021, también se espera un prototipo del producto de cobertura de la tierra a 10 m que cubra el 10% del globo para finales de agosto de 2020; esto proporcionará una gran oportunidad para explorar más a fondo la forma en que los mapas a escalas finas representan la cobertura de la tierra y el cambio de cobertura de la tierra en el marco de la NDT, especialmente para los pequeños estados insulares y su pertinencia y aplicación de nacional a local.

Los nuevos productos que muestren la cobertura de la tierra serán evaluados para su posterior incorporación a Trends. Earth cuando estén disponibles. Los criterios de selección para dicha incorporación son que los productos deben tener cobertura global, estar a disposición del público sin costo alguno para los usuarios finales, tener licencias que permite compartir, y cumplir con las Normas técnicas sobre calidad mínima de los datos del ODS 15.3.2. Estas normas delimitan productos con tamaños de píxeles de 100 o menos, una precisión mayor de 85%, y un período de producción de al menos 10 años o un plan para su producción durante 10 años (GEO LDN, 2020a).



Medición de los cambios en las existencias de carbono orgánico del suelo

El tercer subindicador para el monitoreo de la degradación de la tierra como parte del proceso del ODS 15 cuantifica los cambios en las existencias de carbono durante el período de presentación de informes.

Los países Partes de la CNUCLD acordaron utilizar el carbono orgánico del suelo (COS) para evaluar la degradación de la tierra, en el entendimiento de que esta variable será reemplazada por las existencias totales de carbono del sistema terrestre cuando los productos globales que representen con precisión esta variable entren en funcionamiento (CNUCLD 22/COP.11). El carbono orgánico del suelo es el subindicador que ofrece el menor número de productos espacialmente explícitos, dada la complejidad requerida para generar tal conjunto de datos. La estimación de las existencias de carbono del suelo requiere un número exhaustivo de muestras de suelos de todo el mundo que podría luego ser compilado en un modelo interpolado que representaría esta variable continua de la manera más precisa posible (FAO, 2018). Actualmente no existe un conjunto de datos globalmente coherente y espacialmente explícito de series temporales de carbono orgánico del suelo. Hay una serie de productos modelados que combinan los datos de campo históricamente disponibles sobre COS para producir mapas globales puntuales (Cuadro 8). Esos mapas, cuando se combinan con una serie temporal de datos de cobertura de la tierra y siguen las directrices que se describen en la GBP del ODS 15.3.1, permiten la estimación de los cambios en el COS a través del tiempo.

Cuadro 8 – Productos que representan el carbono orgánico del suelo (COS) fácilmente disponibles al público

Nombre	Fuente	Resolución espacial	Cobertura temporal	Frecuencia de las actualizaciones	¿Listo para análisis?	Extensión
SoilGrids V 2.0	ISRIC	250 m	2015	N/A	Sí	Global
SoilGrids	ISRIC	250 m	2010	N/A	Sí	Global
Contenido de carbono orgánico del suelo OpenLandMap (mapa abierto del suelo)	EnvirometriX Ltd	250 m	Combinación puntual que cubre del 1º de enero de 1950 al 1º de enero de 2018	N/A	Sí	Global
Carbono orgánico del suelo global en tierras agrícolas - Derivado de Soilgrids	CIAT	250 m	2010	N/A	Sí	Global
Mapa de carbono orgánico del suelo global - GSOCmap (v1.5.0))	FAO	1km	1990 (línea base)	N/A	Sí	Global

Conclusiones sobre la revisión de datos sobre carbono orgánico del suelo

Tal como se define en el marco conceptual de la NDT, idealmente la degradación de la tierra se evaluaría teniendo en cuenta las existencias de carbono en la biomasa y el suelo. Los nuevos productos que representan el carbono del suelo y la biomasa están en constante desarrollo, pero no se ha llegado al punto de producir productos anuales sobre el carbono orgánico del suelo (Cuadro 8) o de la biomasa (Cuadro 9). Esta es la razón del enfoque presentado en la Guía sobre Buenas Prácticas del ODS 15.3.1 (Sims et al., 2017), que combina los mapas de cobertura de la tierra y los coeficientes de transición para estimar el cambio en el COS a partir de una línea base, que siguen siendo los más relevantes. SoilGrids V 2.0 es el mejor conjunto de datos para evaluar los cambios en carbono orgánico del suelo, dado que cuenta con la resolución espacial más fina de los productos aquí evaluados. Cuando estén disponibles los productos nuevos y/o actualizados que representan las existencias de carbono, serán evaluados en relación con las Normas sobre calidad mínima de los datos de ODS 15.3.1; si las satisfacen, serán considerados para su inclusión en Trends.Earth (GEO LDN, 2020a). Cuadro 9 - (Apéndice) muestra los productos actualmente disponibles que representan la biomasa por encima y por debajo del suelo.



Conclusiones

La revisión de los productos geospaciales globales disponibles en la actualidad que podrían utilizarse para calcular los subindicadores del ODS 15.3.1 muestra que algunos productos prometedores se están haciendo disponibles para complementar las evaluaciones de la degradación de la tierra con productos de resolución moderada. La colección armonizada Landsat-Sentinel es el conjunto de datos más prometedor para monitorear el avance con respecto de la neutralidad de la degradación de la tierra, dada su resolución espacial relativamente alta (10 - 30 m) y una alta frecuencia de repasos (3 a 4 días), lo que aumentará significativamente el número de observaciones en cualquier parte del mundo. No obstante, estos productos no tendrán utilidad en la estimación de las líneas base de la NDT debido a su limitada cobertura temporal, por lo que tendrán que desarrollarse directrices sobre como armonizar dichas diferencias y proporcionarlas a los usuarios.

El NDVI es, sin duda, el indicador de vegetación más utilizado debido a su simplicidad de uso y flexibilidad; no obstante, se han identificado otros dos índices de vegetación que pueden ayudar a evaluar la productividad primaria en tierras donde el uso de NDVI no ha logrado mostrar un desempeño óptimo. Para los bosques tropicales con alta biomasa, el Índice de Vegetación Mejorado a dos bandas (EVI2) ha demostrado tener un mejor desempeño que NDVI; y para las áreas con escasa vegetación y baja biomasa, se recomienda el Índice de Vegetación Ajustado al Suelo Modificado (MSAVI). Se sugiere desarrollar las capacidades de procesamiento en Trends.Earth para derivar los indicadores de productividad utilizando la colección de imágenes Landsat-Sentinel armonizada con NDVI, EVI2, y MSAVI a fin de mejorar el monitoreo de los cambios en la condición de la tierra y así complementar la evaluación actual producida con series de datos a largo plazo MODIS NDVI. Se proporcionarán guías de usuario detalladas sobre el uso recomendado de cada indicador bajo diferentes condiciones.

Para los indicadores de cobertura de la tierra y carbono orgánico del suelo, la revisión no identificó productos nuevos o actualizados a una resolución espacial fina y cobertura global, destacando la importancia de los datos locales de cobertura de la tierra y COS para una evaluación precisa y relevante de la degradación de la tierra. Las funciones para emplear los datos locales de cobertura de la tierra y COS, así como los indicadores locales de productividad de la tierra, ya están disponibles en Trends.Earth y serán críticos en los ciclos futuros de presentación de informes. Trends.Earth seguirá apoyando los productos globales actuales, y verificará periódicamente con los proveedores de datos para incorporar cualquier conjunto de datos pertinente, nuevo o actualizado, que pudiera añadirse a la herramienta si cumple con las recomendaciones y requisitos de calidad determinados por la GBP del ODS 15.3.1 y la Iniciativa GEO LDN.



Referencias

- Anav, A., Friedlingstein, P., Beer, C., Ciais, P., Harper, A., Jones, C., Murray-Tortarolo, G., Papale, D., Parazoo, N.C., Peylin, P., Piao, S., Sitch, S., Viovy, N., Wiltshire, A., Zhao, M., 2015. Spatiotemporal patterns of terrestrial gross primary production: A review: GPP Spatiotemporal Patterns. *Rev. Geophys.* 53, 785–818. <https://doi.org/10.1002/2015RG000483>
- Azzari, G., Lobell, D.B., 2017. Landsat-based classification in the cloud: An opportunity for a paradigm shift in land cover monitoring. *Remote Sens. Environ.* 202, 64–74. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.05.025>
- Bai ZG, Jong de R, van Lynden GWJ 2010. An update of GLADA – Global assessment of land degradation and improvement. ISRIC report 2010/08, ISRIC – World Soil Information, Wageningen, 58p
- Bai ZG, Dent DL, Olsson L and Schaepman ME 2008. Global Assessment of Land Degradation and Improvement. 1 Identification by remote sensing. Report 2008/01 (GLADA Report 5), ISRIC – World Soil Information, Wageningen, 70p
- Broich, M., Huete, A., Tulbure, M.G., Ma, X., Xin, Q., Paget, M., Restrepo-Coupe, N., Davies, K., Devadas, R., & Held, A. (2014). Land surface phenological response to decadal climate variability across Australia using satellite remote sensing. *Biogeosciences*, 11, 5181-5198
- Broge, N.H., Mortensen, J.V., 2002. Deriving green crop area index and canopy chlorophyll density of winter wheat from spectral reflectance data. *Remote Sens. Environ.* 81, 45–57. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(01\)00332-7](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(01)00332-7)
- CEOS - Committee on Earth Observation Satellites, 2020. Available online at <http://ceos.org/ard/index.html#slide2>
- Chehbouni, J.Q., Huete, A.R., Kerr, Y.H., Sorooshian, S. (1994). A modified soil adjusted vegetation index. *Remote Sens. Environm.* 48:119-126
- Cherlet, M., Hutchinson, C., Reynolds, J., Hill, J., Sommer, S., von Maltitz, G. (Eds.). 2018. World Atlas of Desertification, Publication Office of the European Union, Luxembourg.
- Clark, D.A., Brown, S., Kicklighter, D.W., Chambers, J.Q., Thomlinson, J.R., Ni, J., Holland, E.A., 2001. Net primary production in tropical forests: an evaluation and synthesis of existing field data. *Ecol. Appl.* 11, 371–384. [https://doi.org/10.1890/1051-0761\(2001\)011\[0371:NPPITF\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1051-0761(2001)011[0371:NPPITF]2.0.CO;2)
- Claverie, M., Ju, J., Masek, J.G., Dungan, J.L., Vermote, E.F., Roger, J.-C., Skakun, S.V., Justice, C., 2018. The Harmonized Landsat and Sentinel-2 surface reflectance data set. *Remote Sens. Environ.* 219, 145–161. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.09.002>
- Cowie, A.L., Orr, B.J., Castillo Sanchez, V.M., Chasek, P., Crossman, N.D., Erlewein, A., Louwagie, G., Maron, M., Metternicht, G.I., Minelli, S., Tengberg, A.E., Walter, S., Welton, S., 2018. Land in balance: The scientific conceptual framework for Land Degradation Neutrality. *Environ. Sci. Policy* 79, 25–35. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2017.10.011>
- Di Gregorio, A., 2005. Land Cover Classification System: Classification Concepts and User Manual, software version 2 (United Nations Food and Agriculture Organization, Rome)
- Doninck, J.v., Tuomisto, H., 2017. Influence of compositing criterion and data availability on pixel-based Landsat TM/ETM+ image compositing over Amazonian forests. *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens.* 10, 857–867.
- Dwyer, J., Roy, D., Sauer, B., Jenkerson, C., Zhang, H., Lymburner, L., 2018. Analysis Ready Data: Enabling Analysis of the Landsat Archive (preprint). EARTH SCIENCES. <https://doi.org/10.20944/preprints201808.0029.v1>

- ESA - European Space Agency, Sentinel 2, 2020. Sentinel - 2 Operations. Available online at https://www.esa.int/Enabling_Support/Operations/Sentinel-2_operations
- ESA - European Space Agency, WorldCover, 2020. Worldwide land cover mapping. Available online at <https://esa-worldcover.org/en>
- ESA - European Space Agency, 2017. Land Cover CCI Product User Guide Version 2. Tech. Rep. Available at: maps.elie.ucl.ac.be/CCI/viewer/download/ESACCI-LC-Ph2-PUGv2_2.0.pdf
- Fensholt, R., Rasmussen, K., Kaspersen, P., Huber, S., Horion, S., Swinnen, E., 2013. Assessing Land Degradation/Recovery in the African Sahel from Long-Term Earth Observation Based Primary Productivity and Precipitation Relationships. *Remote Sens.* 5, 664–686. <https://doi.org/10.3390/rs5020664>
- Fensholt, R., Sandholt, I., Rasmussen, M.S., Stisen, S., Diouf, A., 2006. Evaluation of satellite based primary production modelling in the semi-arid Sahel. *Remote Sens. Environ.* 105, 173–188. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.06.011>
- FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2018. Soil organic carbon mapping cookbook. Available online at <http://www.fao.org/3/I8895EN/i8895en.pdf>
- Flood, N., 2013. Seasonal Composite Landsat TM/ETM+ Images Using the Medoid (a Multi-Dimensional Median). *Remote Sens.* 5, 6481–6500. <https://doi.org/10.3390/rs5126481>
- Gao, L., Wang, X., Johnson, B.A., Tian, Q., Wang, Y., Verrelst, J., Mu, X., Gu, X., 2020. Remote sensing algorithms for estimation of fractional vegetation cover using pure vegetation index values: A review. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 159, 364–377. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2019.11.018>
- Gausman, D.H., 1974. Leaf Reflectance of Near-Infrared 9. *Photogrammetric Engineering*, 40, 183.
- GEO LDN - Group on Earth Observation Initiative on Land Degradation Neutrality, 2020a. Minimum data quality standards and decision trees for SDG Indicator 15.3.1: Proportion of land that is degraded over total land area. Technical Note, Group on Earth Observation Land Degradation Neutrality (GEO-LDN) Initiative, Geneva, Switzerland.
- GEO LDN - Group on Earth Observation Initiative on Land Degradation Neutrality, 2020b. Available online at https://www.earthobservations.org/uploads/event_se/678_geo_ldn_tor_rev7.pdf
- Gilbert, M.A., González-Piqueras, J., García-Haro, F.J., Meliá, J., 2002. A generalized soil-adjusted vegetation index. *Remote Sens. Environ.* 82, 303–310. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00048-2](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00048-2)
- Housman, I., Chastain, R., Finco, M., 2018. An Evaluation of Forest Health Insect and Disease Survey Data and Satellite-Based Remote Sensing Forest Change Detection Methods: Case Studies in the United States. *Remote Sens.* 10, 1184. <https://doi.org/10.3390/rs10081184>
- Huete, A.R., 1988. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sens. Environ.* 25, 295–309. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(88\)90106-X](https://doi.org/10.1016/0034-4257(88)90106-X)
- Ivits, E., & Cherlet, M. (2016). Land productivity dynamics: towards integrated assessment of land degradation at global scales. In Luxembourg: Joint Research Centre. <http://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC80541/lb-na-26052-en-n%20.pdf>.
- Jiang, Z.Y., Huete, A.R., Didan, K., Miura, T., 2008. Development of a two-band enhanced vegetation index without a blue band. *Remote Sens. Environ.* 112, 3833–3845
- Jin, H., Eklundh, L., 2014. A physically based vegetation index for improved monitoring of plant phenology. *Remote Sens. Environ.* 152, 512–525. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.07.010>
- Karkauskaite, P., Tagesson, T., Fensholt, R., 2017. Evaluation of the Plant Phenology Index (PPI), NDVI and EVI for Start-of-Season Trend Analysis of the Northern Hemisphere Boreal Zone. *Remote Sens.* 9, 485. <https://doi.org/10.3390/rs9050485>
- Kong, D., Zhang, Y., Gu, X., Wang, D., 2019. A robust method for reconstructing global MODIS EVI time series on the Google Earth Engine. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 155, 13–24. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2019.06.014>
- LeVine, D., Crews, K., 2019. Time series harmonic regression analysis reveals seasonal vegetation productivity trends in semi-arid savannas. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinformation* 80, 94–101. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.04.007>
- Liu, H. Q., Huete, A., 1995. A feedback based modification of the NDVI to minimize canopy background and atmospheric noise. *IEEE Trans. on Geosciences and Remote Sensing*, Vol:33, Issue 2. DOI: 10.1109/TGRS.1995.8746027
- Kawabata, A., Ichii, K., & Yamaguchi, Y. 2001 Global monitoring of interannual changes in vegetation activities using NDVI and its relationships to temperature and precipitation, *International Journal of Remote Sensing*, 22:7, 1377-1382, DOI: 10.1080/01431160119381
- Ma, X., Huete, A., Moran, S., Ponce-Campos, G., Eamus, D., 2015. Abrupt shifts in phenology and vegetation productivity under climate extremes: ECOSYSTEM FUNCTIONAL RESPONSE TO DROUGHT. *J. Geophys. Res. Biogeosciences* 120, 2036–2052. <https://doi.org/10.1002/2015JG003144>
- Marsett, R.C., Qi, J., Heilman, P., Biedenbender, S.H., Watson, M.C., Amer, S., Wertz, M., Goodrich, D., Marsett, R., 2006. Remote Sensing for Grassland Management in the Arid Southwest 11.
- Monteith, J.L., 1977. Climate and the efficiency of crop production in Britain 18. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. B.* 281, 277-294.
- Monteith, J.L., 1972. Solar Radiation and Productivity in Tropical Ecosystems. *J. Appl. Ecol.* 9, 747. <https://doi.org/10.2307/2401901>
- Moon, M., Zhang, X., Henebry, G.M., Liu, L., Gray, J.M., Melaas, E.K., Friedl, M.A., 2019. Long-term continuity in land surface phenology measurements: A comparative assessment of the MODIS land cover dynamics and VIIRS land surface phenology products. *Remote Sens. Environ.* 226, 74–92. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.03.034>
- NASA - National Aeronautics and Space Administration Landsat 9, 2020. Continuing the Legacy - 2021 and beyond. Available online at <https://landsat.gsfc.nasa.gov/landsat-9/>
- Neinavaz, E., Darvishzadeh, R., Skidmore, A., Abdullah, H., 2019. Integration of Landsat-8 Thermal and Visible-Short Wave Infrared Data for Improving Prediction Accuracy of Forest Leaf Area Index. *Remote Sens.* 11, 390. <https://doi.org/10.3390/rs11040390>
- Neinavaz, E., Skidmore, A.K., Darvishzadeh, R., 2020. Effects of prediction accuracy of the proportion of vegetation cover on land surface emissivity and temperature using the NDVI threshold method. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinformation* 85, 101984. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.101984>
- Odum, E.P., 1968. Energy Flow in Ecosystems: A Historical Review. *Am. Zool.* 8, 11–18. <https://doi.org/10.1093/icb/8.1.11>
- Olsen, J.L., Mische, S., Ceccato, P., Fensholt, R., 2015. Does EO NDVI seasonal metrics capture variations in species composition and biomass due to grazing in semi-arid grassland savannas? *Biogeosciences* 12, 4407–4419. <https://doi.org/10.5194/bg-12-4407-2015>
- OpenForis, 2020. Collect Earth: Augmented Visual Interpretation for Land Monitoring. Available online at <http://www.openforis.org/tools/collect-earth.html>

- Qi, J., Chehbouni, A., Huete, A.R., Kerr, Y.H., Sorooshian, S., 1994. A modified soil adjusted vegetation index. *Remote Sens. Environ.* 48, 119–126. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(94\)90134-1](https://doi.org/10.1016/0034-4257(94)90134-1)
- Shabanov, N., Vargas, M., Miura, T., Sei, A., Danial, A., 2015. Evaluation of the performance of Suomi NPP VIIRS top of canopy vegetation indices over AERONET sites. *Remote Sens. Environ.* 162, 29–44. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.02.004>
- Sims, N.C., England, J.R., Newnham, G.J., Alexander, S., Green, C., Minelli, S., Held, A., 2019. Developing good practice guidance for estimating land degradation in the context of the United Nations Sustainable Development Goals. *Environ. Sci. Policy* 92, 349–355. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2018.10.014>
- Sims, N.C., Green, C., Newnham, G.J., England, J.R., Held, A., Wulder, M.A., Herold, M., Cox, S.J.D., Huete, A.R., Kumar, L., Viscarra Rossel, R.A., Roxburgh, S.H., McKenzie, N.J., 2017. Good Practice Guidance. SDG Indicator 15.3.1, Proportion of Land That Is Degraded Over Total Land Area (p. 115). United Nations Convention to Combat Desertification, Bonn, Germany. http://www2.unccd.int/sites/default/files/relevant-links/2017-10/Good%20Practice%20Guidance_SDG%20Indicator%2015.3.1_Version%201.0.pdf
- Skakun, S., Franch, B., Vermote, E., Roger, J.-C., Becker-Reshef, I., Justice, C., Kussul, N., 2017. Early season large-area winter crop mapping using MODIS NDVI data, growing degree days information and a Gaussian mixture model. *Remote Sens. Environ.* 195, 244–258. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.04.026>
- SDGs - Sustainable Development Goals, 2020. Available online at <https://sdgs.un.org/goals>
- Trends.Earth. Conservation International, 2018. Available online at: <http://trends.earth>.
- Trends.Earth. Conservation International, 2020. Available online at http://trends.earth/docs/en/background/understanding_indicators15.html
- Tucker, C., Pinzon, J., 2017. Using spectral vegetation indices to measure gross primary productivity as an indicator of land degradation 70. Available online at http://vitalsigns.org/sites/default/files/VS_GEFLDMP_Report1_C1_R3_WEB_HR.pdf
- Tucker, C.J., 1979. Red and Photographic Infrared linear Combinations for Monitoring Vegetation 24. *Remote Sens. Environ.* 8:127-150.
- UN - United Nations, 2015. Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development. Available online at <https://sustainabledevelopment.un.org/post2015/transformingourworld/publication>
- UNCCD - United Nations Convention to Combat Desertification, 2018. Preliminary analysis - strategic objective 1: To improve the condition of affected ecosystems, combat desertification/land degradation, promote sustainable land management and contribute to land degradation neutrality.
- UNCCD - United Nations Convention to Combat Desertification, 2016. Report of the Conference of the Parties on its twelfth session, held in Ankara from 12 to 23 October 2015.
- UNCCD - United Nations Convention to Combat Desertification, 2013. Decision 22.COP.11. Advice on how best to measure progress objectives 1, 2 and 3 of The Strategy. <https://knowledge.unccd.int/sites/default/files/inline-files/Decision22-COP11.pdf>
- Wu, C., Munger, J.W., Niu, Z., Kuang, D., 2010. Comparison of multiple models for estimating gross primary production using MODIS and eddy covariance data in Harvard Forest. *Remote Sens. Environ.* 114, 2925–2939. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.07.012>
- Wulder, M.A., White, J.C., Loveland, T.R., Woodcock, C.E., Belward, A.S., Cohen, W.B., Fosnight, E.A., Shaw, J., Masek, J.G., Roy, D.P., 2016. The global Landsat archive: Status, consolidation, and direction. *Remote Sens. Environ.* 185, 271–283. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.11.032>
- Xu, X., Zhou, G., Du, H., Mao, F., Xu, L., Li, X., Liu, L., 2020. Combined MODIS land surface temperature and greenness data for modeling vegetation phenology, physiology, and gross primary production in terrestrial ecosystems. *Sci. Total Environ.* 137948. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137948>
- Yengoh, G.T., Dent, D., Olsson, L., Tengberg, A.E., Tucker III, C.J., 2016. Use of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) to Assess Land Degradation at Multiple Scales, Springer Briefs in Environmental Science. Springer International Publishing, Cham. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-24112-8>
- Verbesselt, J., Hyndman, R.J., Newnham, G., Culvenor, D. (2010). Detecting trend and seasonal changes in satellite image time series. *Remote Sensing of Environment* 114(1), 106-115. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.08.014>
- Zhang, X., Wang, J., Henebry, G.M., Gao, F., 2020. Development and evaluation of a new algorithm for detecting 30 m land surface phenology from VIIRS and HLS time series. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 161, 37–51. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2020.01.012>



Appendix

Cuadro 9 – Productos que representan la biomasa por encima y por debajo del suelo fácilmente disponibles al público.

Nombre	Fuente	Resolución espacial	Cobertura temporal	Frecuencia de las actualizaciones	¿Listo para análisis?	Extensión
Densidad de la biomasa leñosa viva por encima del suelo	Global Forest Watch	30 m	2000	NA	Sí	Global
GlobBiomass	ESA/ GlobBiomass	100m	2010	NA	Sí	Global
Mapas globales armonizados de la densidad de carbono de la biomasa por encima y por debajo del suelo en 2010	NASA DAAC	300 m	2010	NA	Sí	Global
WCMC Densidad de carbono por encima y por debajo del suelo	UNEP/WCMC	300 m	2010	NA	Sí	Global
Conjunto de datos sobre existencias de carbono pantropical a nivel nacional / [de biomasa] leñosa viva por encima del suelo del Centro de Investigación Climáticas Woodwell	WCRC	500m	29 de enero de 2012	NA	Sí	No – Trópico solamente
Geocarbon	Wageningen University & Research	1km	2000	NA	Sí	No – Pan-Trópico
Cobertura global de árboles y carbono de la biomasa en tierras agrícolas	Centro Mundial de Agroforestería	1 km	2000 y 2010	NA	Sí	Global
Biomasa global de los bosques sobre la superficie	Guo-Lab	1 km	2004 (línea base)	NA	Sí	Global

