

Efecto de los proyectos solares industriales en la vegetación en Puerto Rico

Luis A. Colón Sánchez

GEOL 6225

Prof. Fernando Gilbes

Introducción

La vegetación es un componente esencial de la biósfera de nuestro Planeta. Sin ella, mucha de la vida que conocemos no existiría. Las plantas llevan a cabo un proceso fundamental para los seres vivos, el cual se conoce como fotosíntesis. Mediante esta reacción bioquímica, las plantas producen oxígeno que permite a los seres vivos con procesos metabólicos aeróbicos llevar a cabo respiración, y también producen azúcares que sirven de alimentos para ellas mismas y para los organismos heterótrofos que se alimentan de ellas. La vegetación se encuentra en diversos tamaños y formas, pero cada especie cumple con una función muy importante en su respectivo hábitat.

Existen procesos naturales que afectan la vegetación, tales como la precipitación, la fauna, la temperatura, los huracanes, entre otros. De igual manera, existen factores antropogénicos que provocan cambios en la vegetación, incluyendo la tala, la siembra, la quema intencional y el uso de maquinaria. Normalmente, lugares donde hoy día existen zonas urbanas o construcciones eran antes lugares ocupados por vegetación. Por otro lado, lugares que antes albergaban una alta concentración de actividad humana, y luego son abandonados, han recobrado gran parte de su vegetación, tal como lo son los bosques secundarios. Estos cambios se han observado y documentado por las personas que frecuentan esos lugares. Sin embargo, hay lugares donde no hay personas que puedan testificar los cambios que ha sufrido la flora, o la extensión territorial que se quiere estudiar es demasiado grande para que esos cambios sean medidos por observaciones “in situ”. La percepción remota juega un papel protagónico para facilitar estos estudios. La señal espectral que reciben los sensores de los satélites en órbita permite calcular valores matemáticos que estiman la salud de un grupo de plantas o la densidad de la vegetación en un espacio dado.

Uno de los métodos más utilizados mediante percepción remota para cuantificar la salud o abundancia de las plantas es el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada, conocido como NDVI por sus siglas en inglés (Toribio, 2019). Éste índice utiliza las señales espectrales en los rangos rojo e infrarrojo, y las relaciona mediante la siguiente ecuación:

$$NDVI = \frac{\text{señal infrarroja} - \text{señal roja}}{\text{señal infrarroja} + \text{señal roja}}$$

El resultado obtenido son valores en el rango de -1 a 1, y mientras más alto el valor, mayor cantidad de vegetación hay en un área, o mejor salud tienen las plantas en esa región. La señal infrarroja obtenida de las plantas es mucho más fuerte que la obtenida en el rojo. Esto se debe a que la radiación infrarroja que proviene del Sol apenas llega al tejido mesófilo esponjoso de las hojas y

rápidamente se refleja o dispersa. Por otro lado, la radiación roja logra llegar hasta los cloroplastos que se encuentran en el tejido de empalizada, y allí es absorbida en su mayoría durante la fotosíntesis. Esto provoca que los valores de la izquierda en la ecuación de NDVI sean mucho más altos que los valores de la derecha.

Uno de los procesos humanos que está provocando cambios en la vegetación en estos últimos años en Puerto Rico es la construcción de proyectos solares industriales o a gran escala. Estos proyectos requieren grandes extensiones de terreno para poder producir una gran cantidad de energía a partir de la energía del Sol. En muchos casos, la construcción de estos proyectos conlleva remover terreno y vegetación con maquinaria para luego instalar los paneles solares, lo cual implica un gran impacto ambiental y un cambio drástico a la vegetación preexistente. Recientemente, se ha estado explorando la posibilidad de combinar la producción de energía solar de estos proyectos y la producción agrícola en los espacios debajo y entre los paneles solares. Este concepto recibe el nombre de Agrovoltaicos. La remoción de la capa superficial de suelo para instalar los paneles solares usualmente elimina nutrientes como el carbono y el nitrógeno, ambos esenciales para las plantas (Zhang et al., 2023). Al evaluar los cambios en vegetación a través del tiempo, se puede determinar si se pueden crecer plantas en esos lugares impactados. Sin embargo, no todas las plantas requieren la misma cantidad de nutrientes, por lo que el hecho de que la vegetación resurja en el lugar no significa que cualquier cultivo se podría sembrar allí sin una fertilización adecuada.

Objetivos

Mediante este trabajo, se calculará el Índice de Vegetación con Diferencia Normalizada antes, durante y después de la construcción de dos proyectos solares industriales en Puerto Rico. Con los valores de NDVI obtenidos alrededor y dentro de los proyectos, se puede evaluar la posibilidad de que crezca vegetación en estos espacios y de que se puedan crear proyectos agrovoltaicos en la Isla.

Metodología

Para este trabajo, se seleccionaron los proyectos Fonroche y Ciro One. El primero está ubicado en Humacao, y lleva varios años en operación desde el año 2016 (LORD, s.f.), mientras que el segundo se encuentra en Salinas, y su construcción se terminó a finales del año 2023 (Energía Estratégica, 2023).

Se utilizaron imágenes de la constelación de satélites Planet Scope, específicamente los satélites Dove y sus sensores Dove-C. Estos tienen una resolución espacial de 3 metros y una resolución spectral de 4 bandas: azul, verde, rojo e infrarrojo cercano (NIR). Esta constelación es de uso comercial, y para obtener acceso gratuito a sus imágenes se creó una cuenta educativa en el portal Planet y se justificó el uso de las imágenes para estos propósitos. Estas imágenes ya cuentan con algunos pre-procesamientos, incluyendo corrección atmosférica.

Para imágenes de principios del 2016 o de fechas anteriores, no habían imágenes de Planet Scope disponibles, en cambio, las imágenes que la Plataforma Planet Explorer tenía disponibles corresponden a la constelación de satélites Rapid Eye y sus sensores RapidEye Earth Imaging System (REIS). Estos sensores cuentan con una resolución especial de 5 metros y una resolución espectral de 5 bandas: azul, verde, rojo, rojo exterior e infrarrojo cercano. Estas imágenes son ortorectificadas y también cuentan con corrección atmosférica.

Para extraer las imágenes de Planet Explorer, se localizó el lugar de interés, se seleccionaron el área y los rangos de fechas de interés, y se seleccionaron imágenes con muy poca o ninguna presencia de nubes o que tuvieran buena claridad. Manualmente se trazó un polígono alrededor del área de interés, luego se verificó que el archivo tuviera las bandas espectrales necesarias (rojo e infrarrojo cercano), y se procedió a descargar la imagen en formato .tiff. Para cada proyecto solar, se descendieron varias imágenes correspondientes a varias fechas en diferentes años, para así poder observar adecuadamente el cambio en cobertura vegetal. Se obtuvieron imágenes de las áreas de interés en su estado previo al desarrollo del proyecto, durante el desarrollo del proyecto y luego de completado el proyecto.

Luego de obtenidas las imágenes, las mismas se procesaron en el programa ENVI. Se intentó aplicar la corrección atmosférica mediante el método Dark Subtraction a una imagen de cada proyecto solar, pero al verificar los valores con Cursor Value resultaron ser iguales a los de la imagen original, por lo que no fue necesario realizar este paso con las demás imágenes. Luego, a las imágenes se les realizó un mejoramiento en la visualización mediante la función Stretch, para que no se vieran tan oscuras. Después, se realizó el cálculo del NDVI mediante la función Band Math. Al algoritmo se le introdujo la siguiente ecuación:

$$(float(b1) - float(b2)) / (float(b1) + float(b2))$$

donde a la variable “b1” se le asignaron los valores de la banda infrarrojo cercano (NIR) y a “b2” se le asignaron los valores de la banda roja. El término “float” se añade a la ecuación para asegurar que los valores de la señal de las bandas espectrales sean reconocidos como valores con dígitos decimales, y por lo tanto, los valores finales de NDVI también serán números con decimales entre -1 y 1 (ej. 0.634, -0.293). Al completar la ecuación, el programa corre el algoritmo y calcula el índice para cada imagen. La imagen producida inicialmente está en blanco y negro, por lo que se modificaron los colores mediante los pasos “Change Color Table → Brewer Table → CB Greens”. Los colores verdes más intensos representan valores de NDVI más altos, y los colores más claros o blancos representan valores más bajos. En este caso, no se produjeron valores negativos, ya que estos valores usualmente ocurren en el agua, ya que ésta absorbe más la señal infrarroja que la roja. Luego de procesada la imagen, se le añadieron los elementos típicos de un mapa usando la función “Annotations”. Se añadió una flecha del norte, una escala, una barra de colores, las coordenadas y un título. Se guardó la imagen final mediante “File → Chip view to → File → JPEG”, se le asignó un nombre al archivo y se guardó mediante “Save”. Lo mismo se realizó con la imagen satelital sin el NDVI, para poder hacer la comparación entre ambas imágenes. No fue necesario aplicar una máscara a las imágenes, ya que se quiere observar la diferencia en los valores de NDVI de las áreas con suelo desnudo, vegetación escasa, vegetación abundante y los paneles solares.

Resultados

En esta sección se muestran las imágenes procesadas en ENVI. Se presenta la imagen satelital y luego la imagen con NDVI para cada fecha seleccionada.

1. Ciro One - Salinas

a. Mayo 2022

En estas imágenes se observa cómo estaba el terreno utilizado para el proyecto antes de su construcción. En el área oeste del proyecto hay vegetación leve, en su mayoría con valores de NDVI menores a 0.5 (Figura 2). En la parte este hay mayor densidad vegetativa, y los valores llegan hasta 0.68 y un poco más altos. Es posible que la región estuviera atravesando un periodo de sequía leve. Las zonas que siempre están en color blanco son las carreteras y construcciones.



Figura 1. Imagen satelital Ciro One Mayo 2022

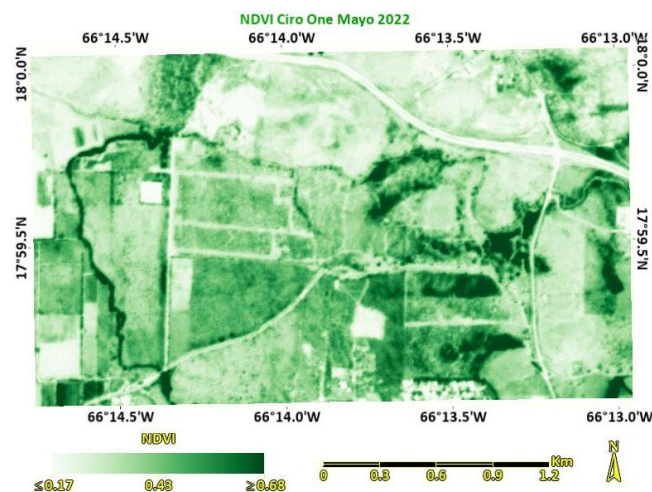


Figura 2. Imagen NDVI Ciro One Mayo 2022

b. Febrero 2023

Aquí se observa que casi un año después, el proyecto ya está en desarrollo. La vegetación ha sido removida con maquinaria y algunos de los paneles solares ya han sido instalados. La imagen de NDVI muestra que el área que ha sido limpiada con maquinaria y construída tiene los colores más claros y los valores de NDVI más bajos. La región al norte presenta colores similares a los que tenía en la imagen anterior, pero la región al sur del proyecto muestra colores verdes más intensos que en la Figura 2. Los valores de NDVI más altos en esta imagen son iguales o mayores a 0.80, siendo mayores a los de la Figura 2. Los terrenos al sur y al oeste parecen ser agrícolas, por lo el aumento en vegetación pudo haber sido por un aumento en irrigación por sistemas de riego. Esta idea parece ser favorecida por el hecho de que los terrenos al norte se mantuvieron con una cobertura vegetal similar, por lo que quizás no se utilizan para agricultura y no han recibido lluvia. Además, febrero es usualmente un mes de sequía para la zona sur de Puerto Rico, incluyendo Salinas (NWS, 2024). En la Figura 3 se observan algunas nubes en las esquinas superior izquierda y superior derecha de la imagen, y éstas produjeron valores de NDVI muy bajos en la Figura 4. Sin embargo, las nubes no afectan mucha área de la imagen, por lo que el análisis aún es válido.

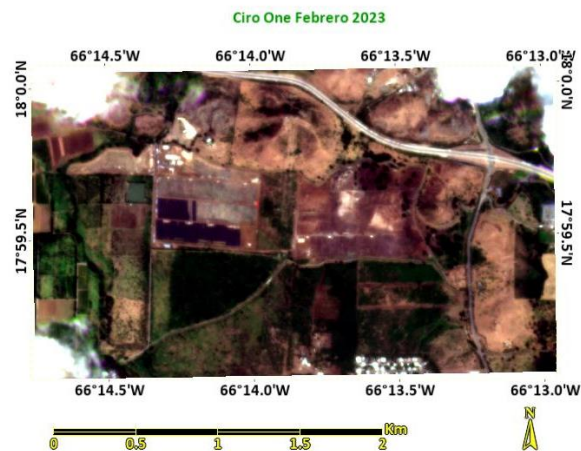


Figura 3. Imagen satelital Ciro One Febrero 2023



Figura 4. Imagen NDVI Ciro One Febrero 2023

c. Abril 2023

Dos meses después, se puede observar que el proyecto está más avanzado y ya cuenta con muchos más paneles solares instalados. Se limpió un área adicional al este con la maquinaria, y comenzó a crecer vegetación en el centro del proyecto. Los terrenos circundantes muestran una cobertura vegetal similar, reflejada en la Figura 6.



Figura 5. Imagen satelital 'Ciro One' Abril 2023

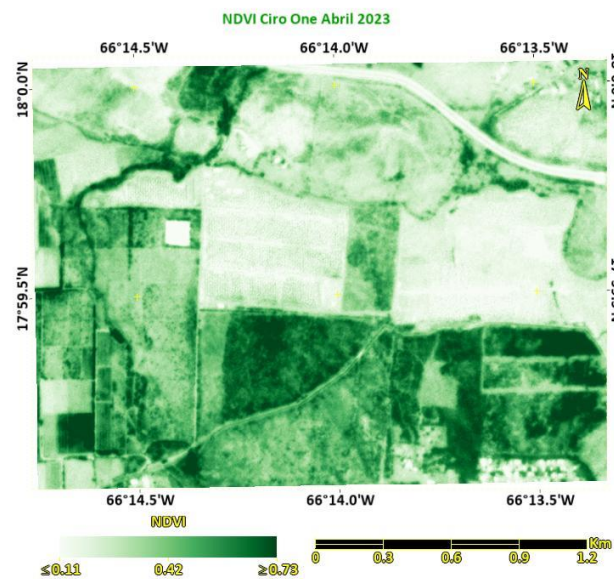


Figura 6. Imagen NDVI 'Ciro One' Abril 2023

d. Junio 2023

De nuevo han pasado dos meses desde las imágenes anteriores, y aquí se observa que se limpió otra parte del terreno al sureste y se han instalado paneles adicionales. Ha comenzado a crecer vegetación en la parte noreste del proyecto, cerca de los paneles. La vegetación circundante se ha mantenido similar a la de dos meses antes. Algunos paneles solares ya no se ven tan brillantes en la imagen satelital (Figura 7), y en la imagen de NDVI (Figura 8) se observa que ya no tienen colores blancos, sino que ahora se ven de color verde claro. Esto podría ser causado por el ángulo del Sol en el momento que se tomó la imagen, o la suciedad que se ha acumulado sobre los paneles.



Figura 7. Imagen satelital 'Ciro One' Junio 2023

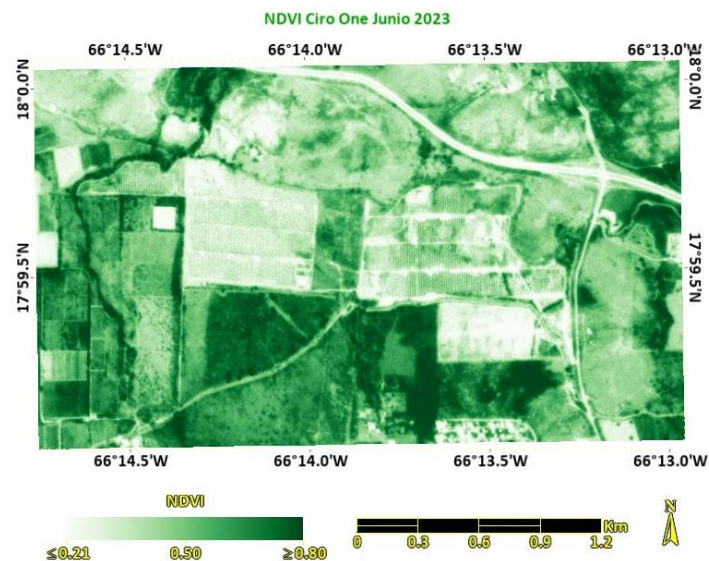


Figura 8. Imagen NDVI 'Ciro One' Junio 2023

e. Noviembre 2023

Cinco meses después, ya se observa que el proyecto está completado y se han instalado todos los paneles solares. Esta época coincide con el final de la temporada de huracanes, y típicamente son meses lluviosos (NWS, 2024). Se observa un aumento considerable en la vegetación en los terrenos alrededor del proyecto. El cambio más drástico ocurrió en los terrenos del norte, que en los meses anteriores estaban bastante secos. Además, hay vegetación creciendo entre los paneles y cerca de ellos en muchas áreas, aunque quedan algunos espacios con suelo desnudo.



Figura 9. Imagen satelital Ciro One Noviembre 2023

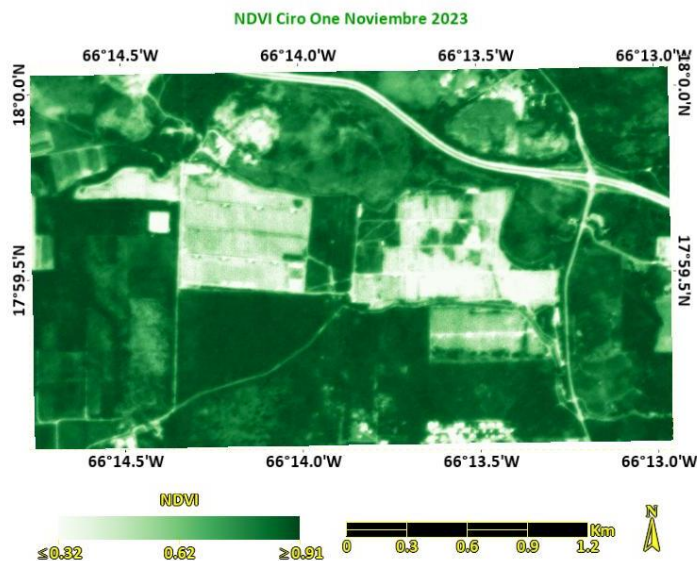


Figura 10. Imagen NDVI Ciro One Noviembre 2023

f. Abril 2024

Esta imagen refleja el estado actual del proyecto. La vegetación disminuyó un poco en comparación a las imágenes de noviembre 2023. El cambio mayor se observa en los terrenos del norte. Aún hay bastante vegetación en la parte central del proyecto, pero la cobertura vegetal entre las filas de paneles y en el perímetro del proyecto disminuyó.



Figura 11. Imagen satelital 'Ciro One' Abril 2024

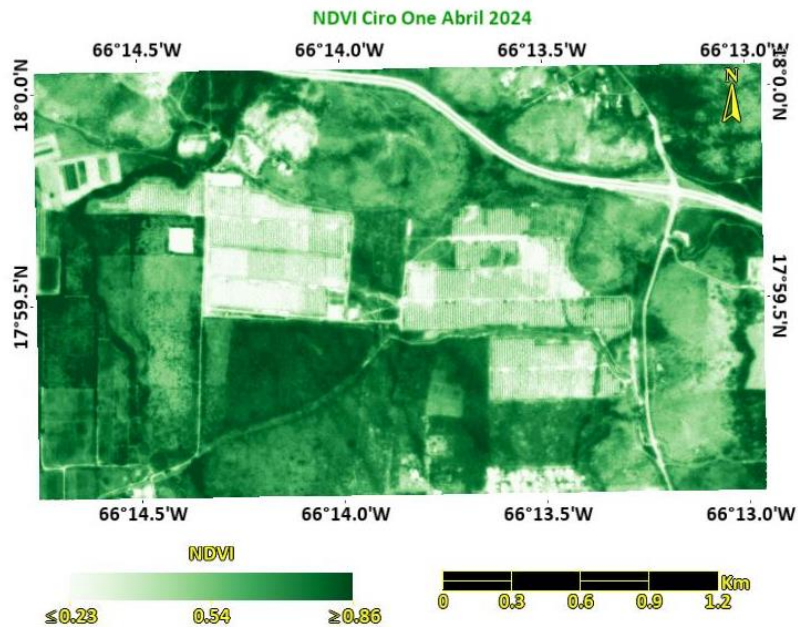


Figura 12. Imagen NDVI 'Ciro One' Abril 2024

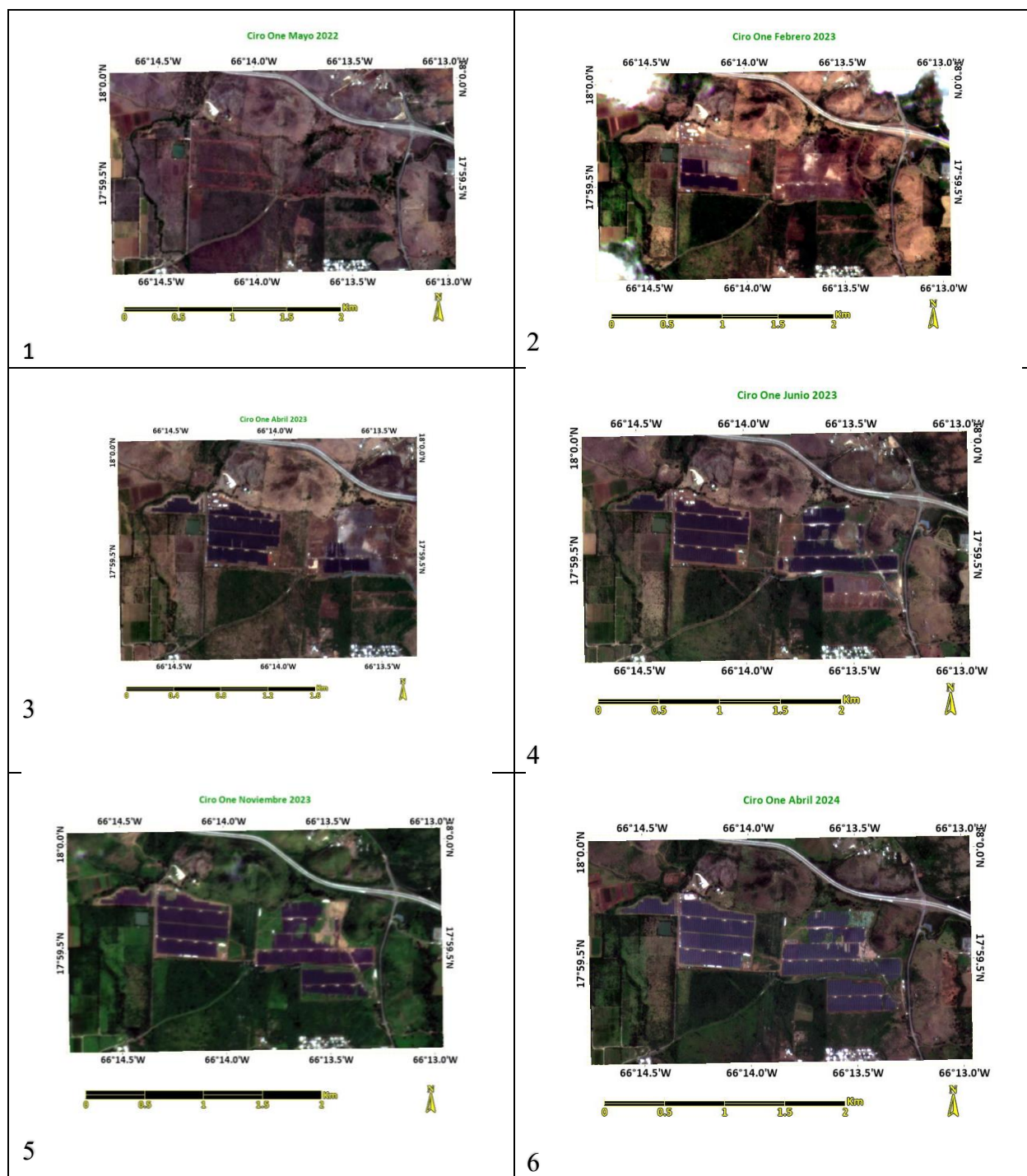


Figura 13. Secuencia de imágenes satelitales antes, durante y después de la construcción de *Ciro One*: Mayo 2022 (1), Febrero 2023 (2), Abril 2023 (3), Junio 2023 (4), Noviembre 2023 (5) y Abril 2024 (6).

Las Figuras 13 y 14 proveen una secuencia de las imágenes satelitales y NDVI para una mejor comparación entre imágenes del mismo tipo con relación al tiempo.

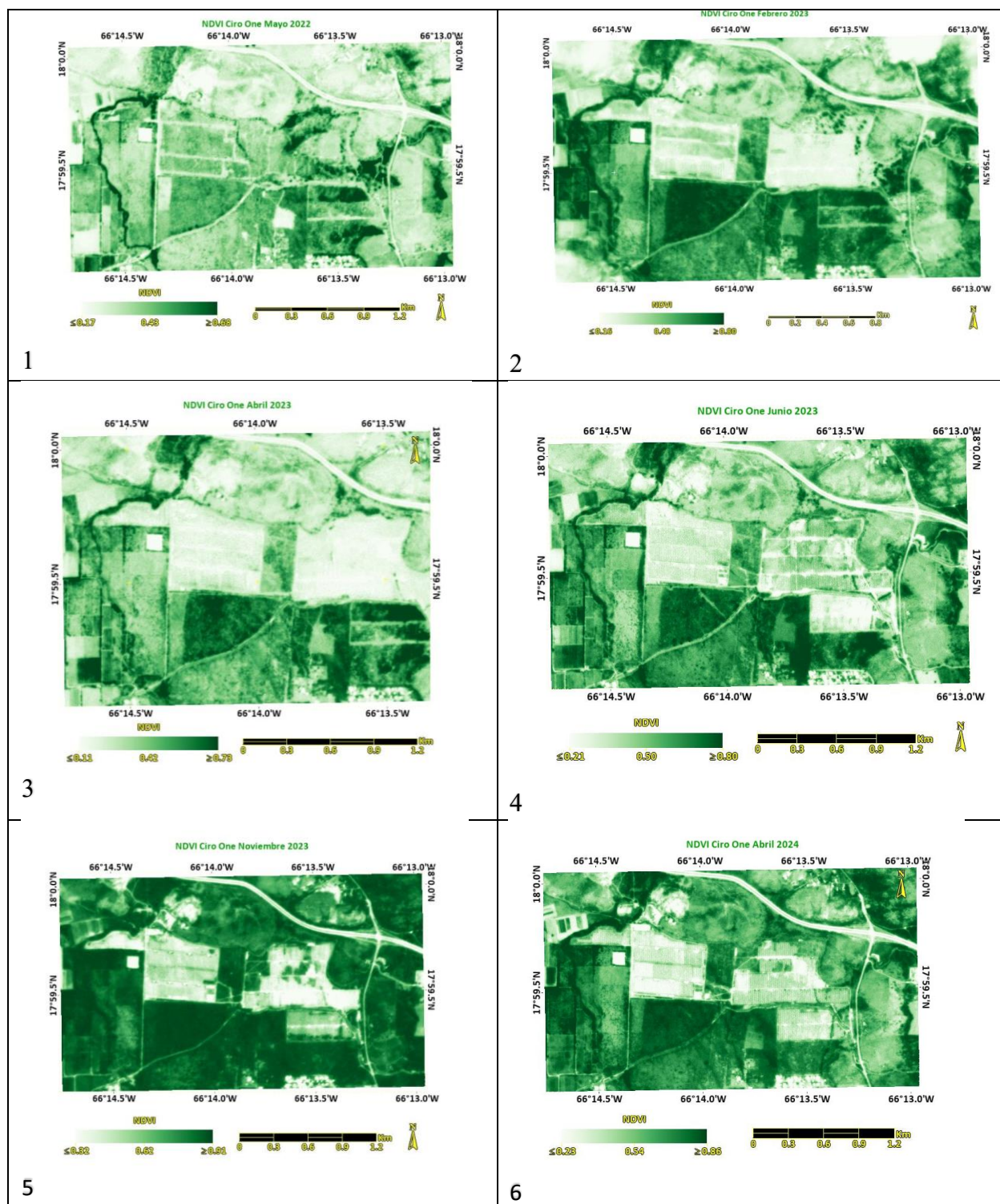


Figura 14. Secuencia de imágenes NDVI antes, durante y después de la construcción de Ciro One: Mayo 2022 (1), Febrero 2023 (2), Abril 2023 (3), Junio 2023 (4), Noviembre 2023 (5) y Abril 2024 (6).

2. Fonroche - Humacao

a. Noviembre 2014

Aquí se observa el estado de los terrenos antes de la construcción del proyecto, el cual se ubica en Humacao, una región no tan seca como Salinas (NWS, 2024). La vegetación en esta zona era abundante cuando se tomó esta imagen del sensor Rapid Eye. Los valores de NDVI pasan de 0.5 en la mayoría de la región. Al igual que con Ciro One, las zonas con colores blancos o muy claros en las imágenes satelitales son carreteras y edificios.

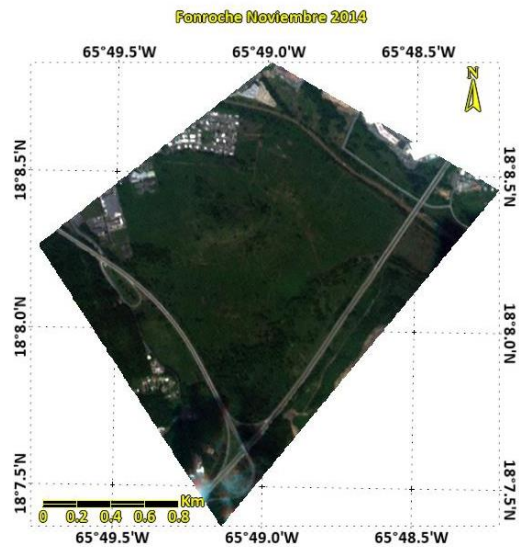


Figura 15. Imagen satelital Fonroche Noviembre 2014

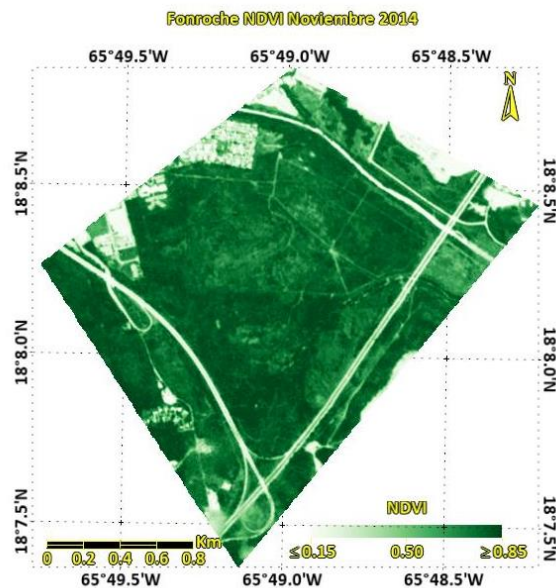


Figura 16. Imagen NDVI Fonroche Noviembre 2014

b. Febrero 2016

En la Figura 17 se observa que ya para esta fecha se ha removido parte de la vegetación con maquinaria, lo cual se refleja en la Figura 18 con colores muy claros y valores de NDVI bajos en esa zona.

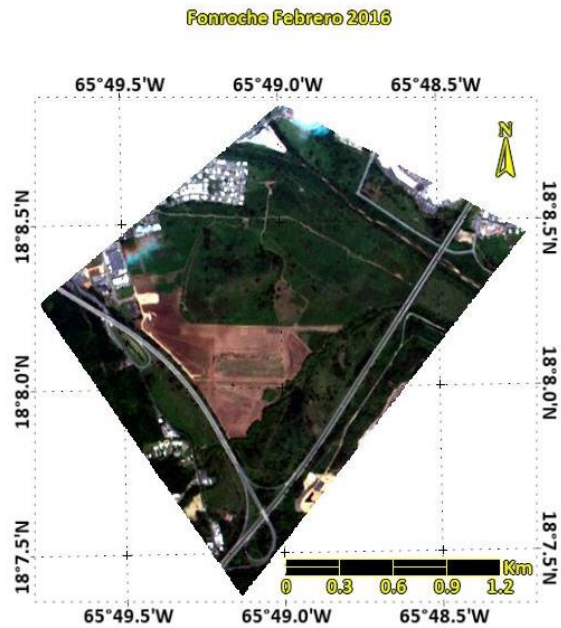


Figura 17. Imagen satelital Fonroche Febrero 2016

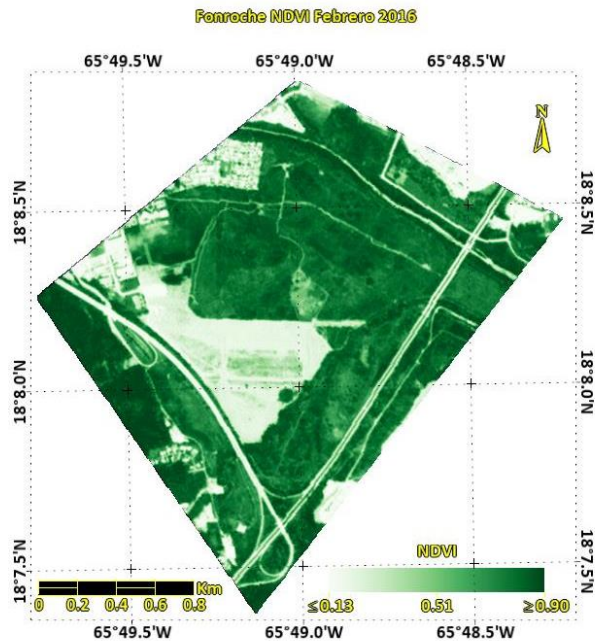


Figura 18. Imagen NDVI Fonroche Febrero 2016

c. Noviembre 2016

Ya para esta fecha se observa que los paneles solares fueron instalados en la zona limpiada por la maquinaria en las imágenes anteriores. Aún se observan colores muy claros y valores muy bajos de NDVI en la Figura 20, ya que los paneles reflejan la señal roja e infrarroja cercana de manera similar a como lo hacen los edificios y las carreteras. También se puede apreciar que ya ha comenzado a crecer vegetación en uno de los “pasillos” entre los paneles solares, ya que la imagen NDVI le asigna unos colores verde oscuro a esta franja de terreno.

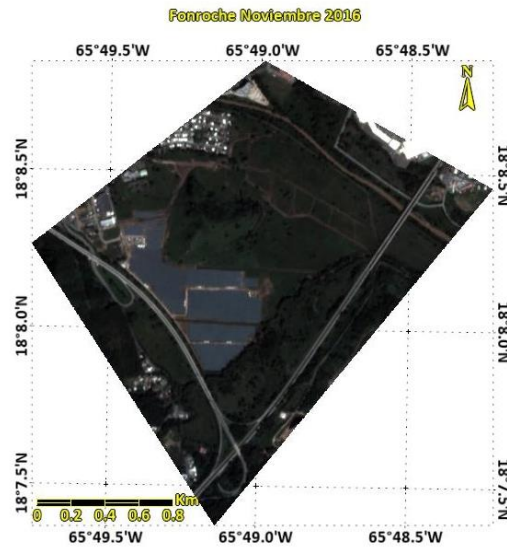


Figura 19. Imagen satelital Fonroche Noviembre 2016

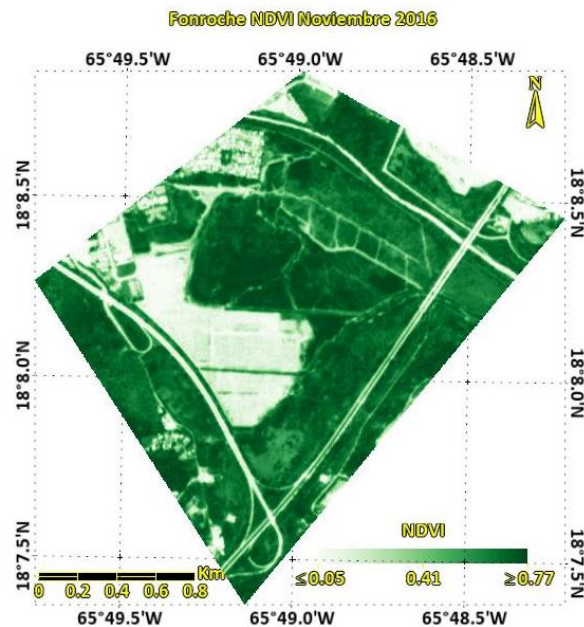


Figura 20. Imagen NDVI Fonroche Noviembre 2016

d. Febrero 2017

En la Figura 21 se observa que para esta fecha ya se había despejado una zona adicional de terreno con la maquinaria. La imagen NDVI refleja esta cambio (Figura 22) al aumentar el área con colores blancos o muy claros y valores de NDVI bajos.

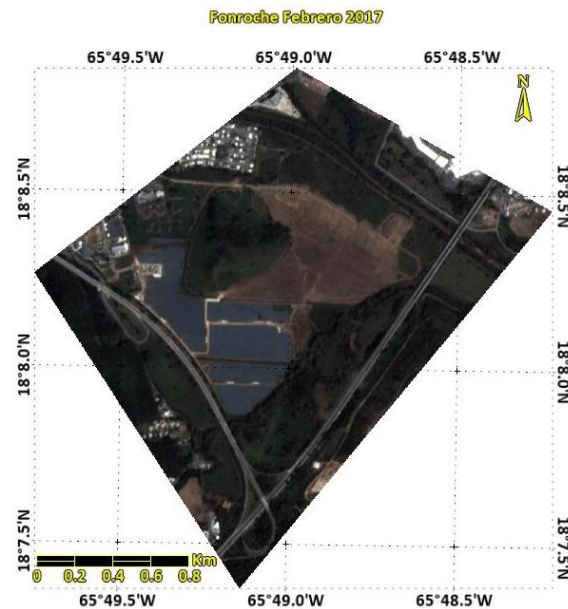


Figura 21. Imagen satelital Fonroche Febrero 2017

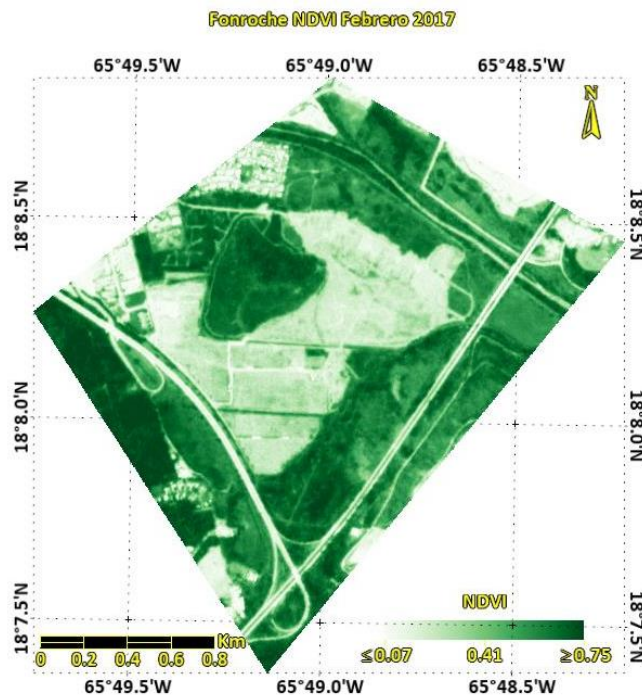


Figura 22. Imagen NDVI Fonroche Febrero 2017

e. Diciembre 2017

En la Figura 23 se observa que a finales de ese mismo año, ya se comenzaron a instalar los paneles solares en la última área que fue despejada por la maquinaria. Interesantemente, muchos de los paneles recién instalados y áreas donde solo habían cimientos pero todavía no habían paneles, y muchos de los paneles más antiguos, comenzaron a mostrar valores de NDVI más altos y colores verdes claros y moderados (Figura 24).

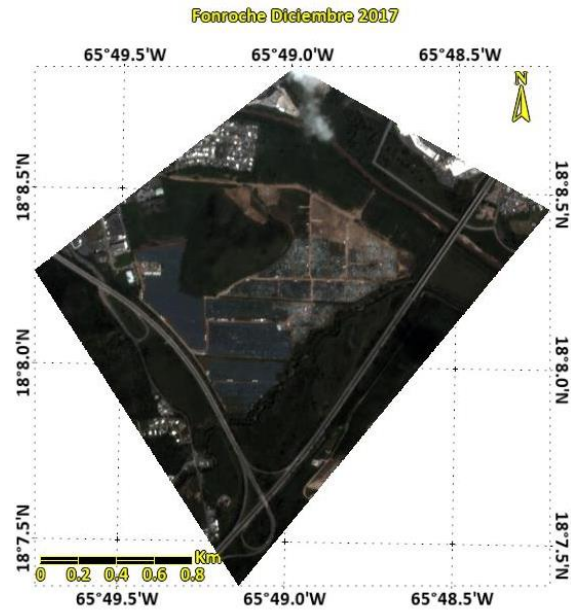


Figura 23. Imagen satelital Fonroche Diciembre 2017

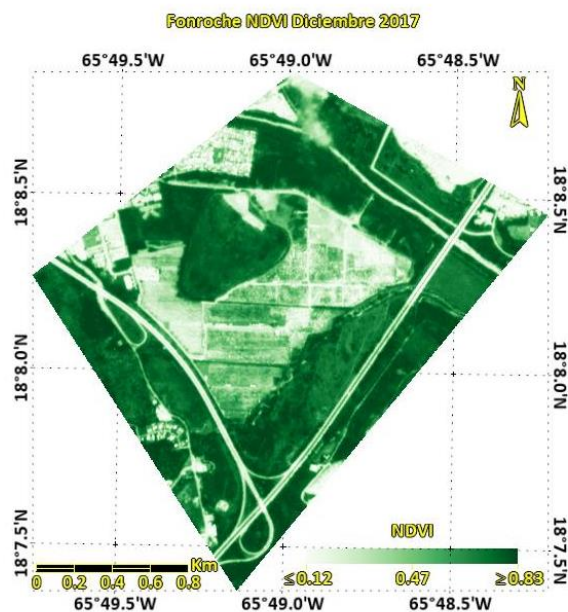


Figura 24. Imagen NDVI Fonroche Diciembre 2017

f. Diciembre 2018

La Figura 25 muestra que para esta fecha, ya la gran mayoría de los paneles solares fueron instalados en el proyecto. La imagen NDVI (Figura 26) muestra que los valores de los paneles disminuyeron y están más cerca de sus valores iniciales, demostrado por colores más claros. Además, unas cinco franjas o “pasillos” entre los paneles muestran crecimiento vegetativo.

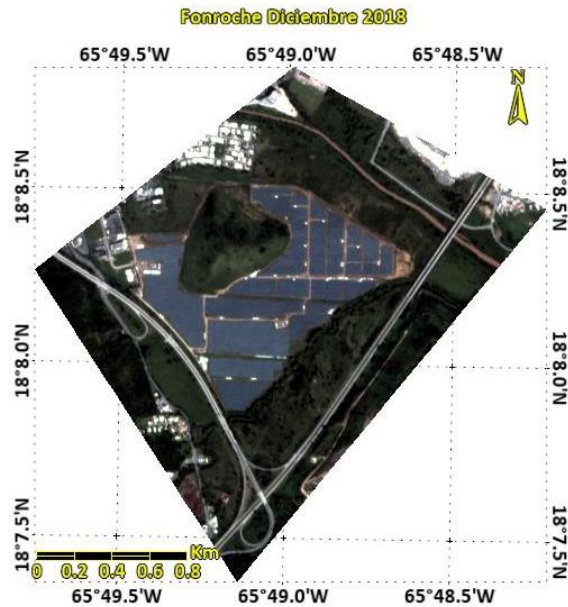


Figura 25. Imagen satelital Fonroche Diciembre 2018

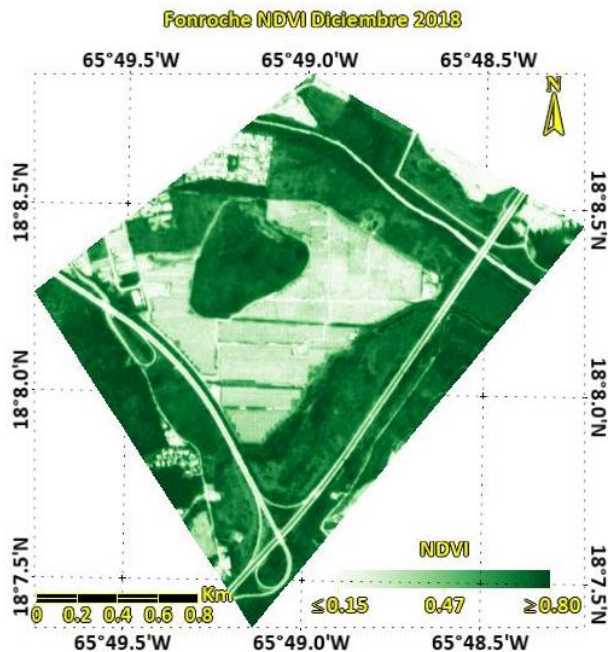


Figura 26. Imagen NDVI Fonroche Diciembre 2018

g. Diciembre 2020

La Figura 27 muestra que para esta fecha, la vegetación más cercana al proyecto disminuyó en su densidad levemente. Esto lo confirma la imagen NDVI con colores más claros. Además, los paneles volvieron a mostrar valores más altos de NDVI y colores más verdes, disminuyendo el contraste con la vegetación circundante.

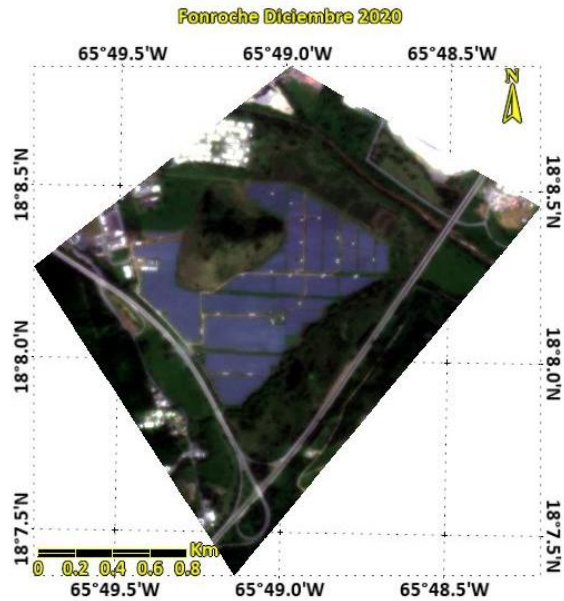


Figura 27. Imagen satelital Fonroche Diciembre 2020

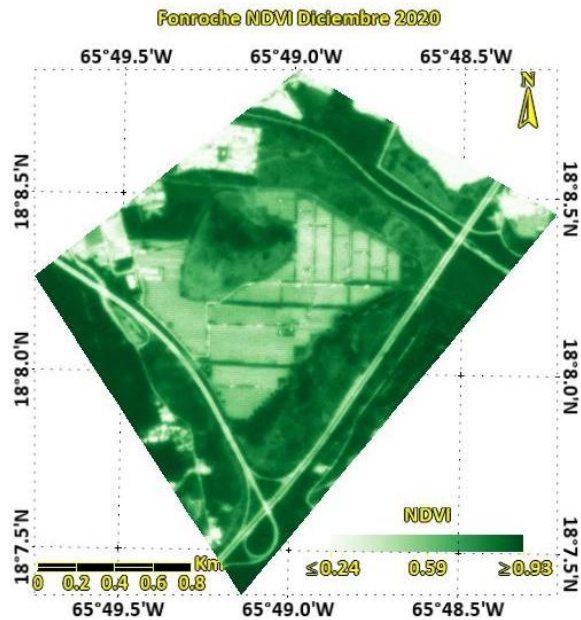


Figura 28. Imagen NDVI Fonroche Diciembre 2020

h. Abril 2021

Para esta fecha, la imagen satelital y la imagen NDVI reflejan una disminución significativa en la vegetación alrededor del proyecto. Por otro lado, los paneles solares siguen mostrando colores verdosos en la Figura 30, y el contraste entre éstos y la vegetación circundante es aún menor. Alguien que observe la imagen NDVI sin observar la imagen satelital podría pensar que el área ocupada por los paneles es vegetación. Los pasillos entre los paneles que tenían vegetación en imágenes anteriores aún la mantienen, y reflejan colores verde más intensos que los paneles solares.

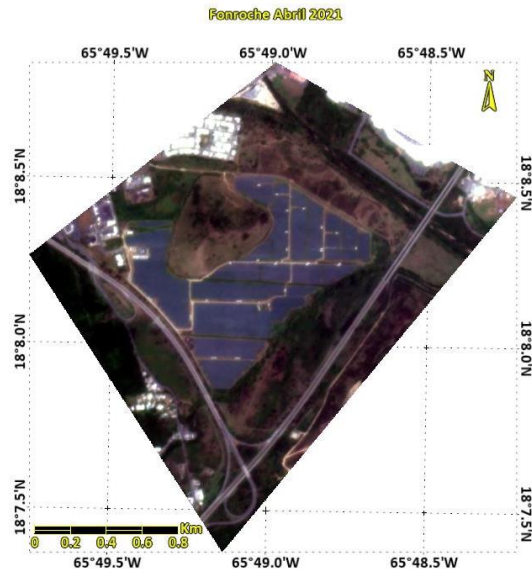


Figura 29. Imagen satelital Fonroche Abril 2021

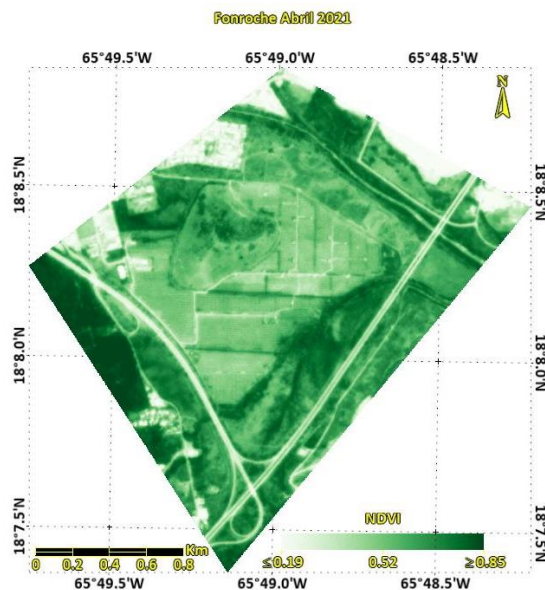


Figura 30. Imagen NDVI Fonroche Abril 2021

i. Abril 2024

Las Figura 31 y 32 muestran el estado actual del proyecto y de la vegetación. Ahora hay más cantidad de pasillos entre los paneles con vegetación. La vegetación alrededor del proyecto aumentó en comparación con las imágenes de abril 2021, pero el contraste entre los paneles solares y la vegetación sigue siendo poco. Solo algunos paneles solares redujeron sus valores de NDVI.

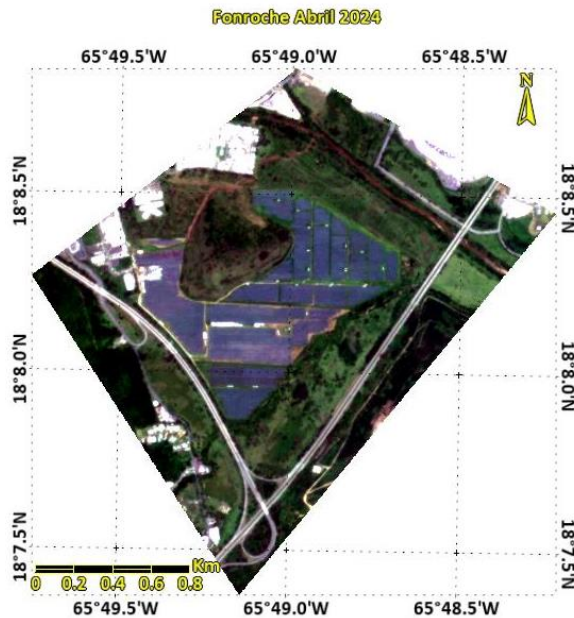


Figura 31. Imagen satelital Fonroche Abril 2024

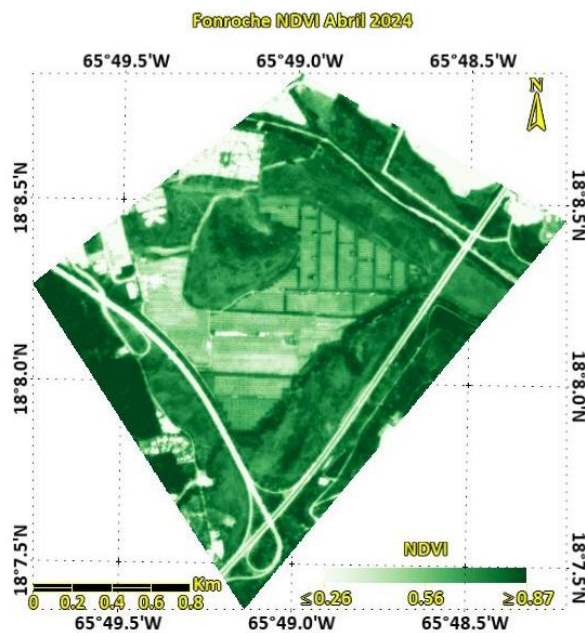


Figura 32. Imagen NDVI Fonroche Abril 2024

Conclusiones

Mediante la observación de imágenes satélites e imágenes del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI, por sus siglas en inglés), se puede concluir que es posible que la vegetación vuelva a crecer en los espacios entre los paneles solares y en los alrededores de éstos, aunque no necesariamente en la totalidad de estas áreas. Hay algunos factores que pueden causar que no crezca vegetación en algunas áreas entre los paneles o alrededor de éstos, tales como el uso frecuente de maquinaria en esa área, una alta compactación del terreno durante la construcción del proyecto, que se haya colocado grava o algún material de relleno, las épocas de sequía, entre otros. Esto podría explicar el hecho de que en las imágenes se observaron algunas regiones en las que nunca creció vegetación, y otras en las que en algunos meses se observaba más vegetación, y en otros meses disminuía. Por otro lado, la resolución de las imágenes utilizadas, que fue de 3 y 5 metros, pudo haber causado que no se vieran muchos de los pasillos entre los paneles solares, los cuales podían o no tener vegetación.

Adicional a eso, mediante las imágenes satelitales no se puede saber si ha crecido la vegetación debajo de los paneles solares, ya que éstos desvían la radiación y evita que alcance el suelo que está justo debajo. Para esto, se necesita de fotos tomadas desde aviones, con drones o durante visitas de campo en el lugar. La Figura 33 muestra que casi todos los pasillos tienen cobertura vegetal en el proyecto Ciro One en Salinas. Además, visitas de campo al lugar confirmaron que hay mucha vegetación debajo de los paneles. El total de la vegetación en este proyecto es hierba común (Sepúlveda, 2024). Con esto, se deja al descubierto una limitación de la percepción remota al aplicarla al estudio de proyectos solares a gran escala.



Figura 33. Foto aérea del proyecto Ciro One (Energía Estratégica, 2023)

Las Figuras 34 y 35 también evidencian el crecimiento vegetativo en los pasillos y debajo de los paneles solares, en este caso en el proyecto Fonroche en Humacao.



Figura 34. Foto aérea Fonroche (LORD, s.f.)



Figura 35. Vista lateral del proyecto Fonroche (GPJ, 2024)

En la Figura 35 se observa que, además de la hierba común, hay arbustos creciendo debajo de los paneles, y han alcanzado la altura suficiente como para atravesar el conjunto de paneles y crecer por encima de éstos.

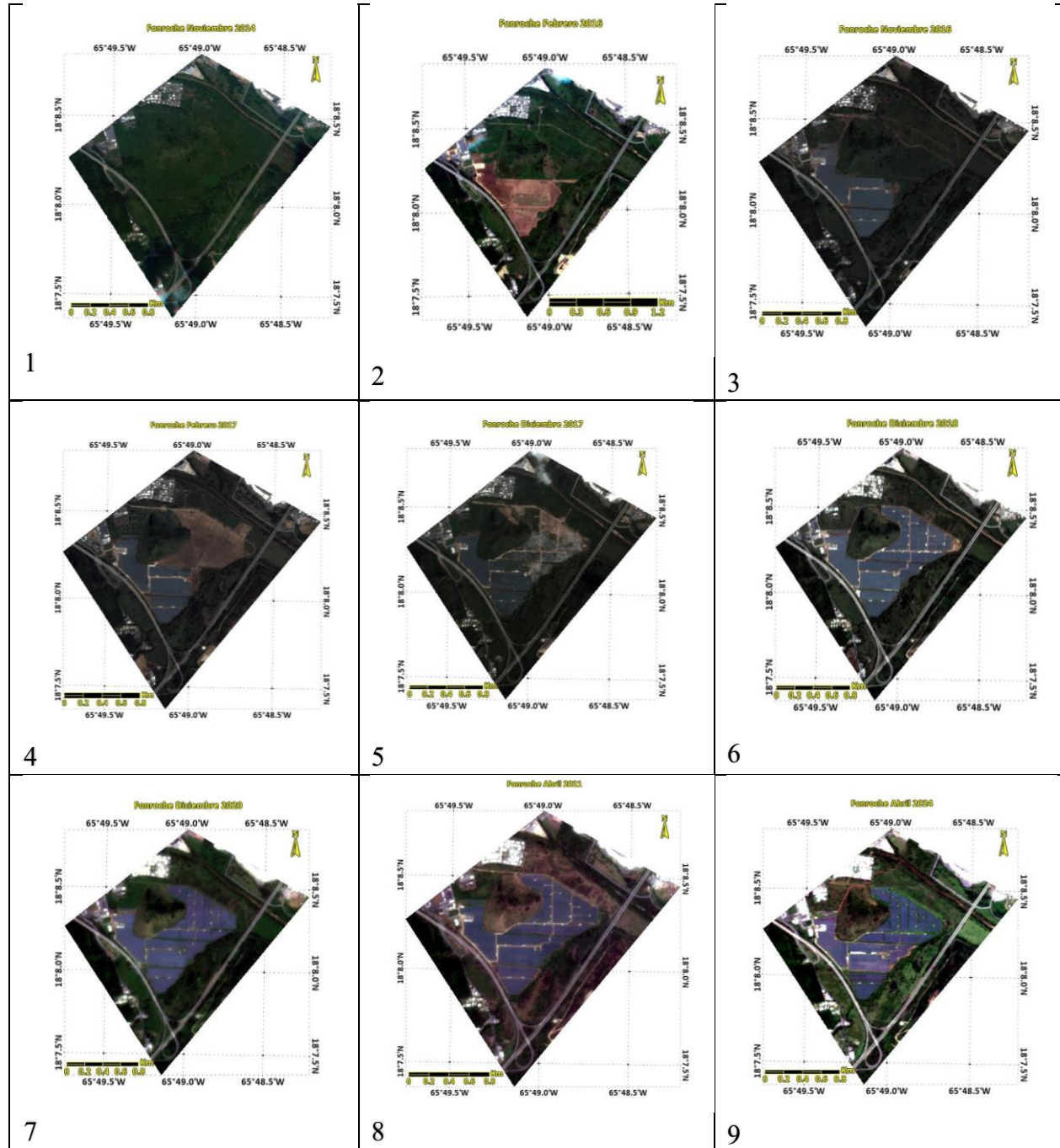


Figura 36. Secuencia de imágenes satelitales antes, durante y después de la construcción de Fonroche: Noviembre 2014(1), Febrero 2016 (2), Noviembre 2016 (3), Febrero 2017 (4), Diciembre 2017 (5), Diciembre 2018 (6), Diciembre 2020 (7), Abril 2021 (8) y Abril 2024 (9).

Las Figuras 36 y 37 proveen una secuencia de las imágenes satelitales y NDVI para una mejor comparación entre imágenes del mismo tipo con relación al tiempo.

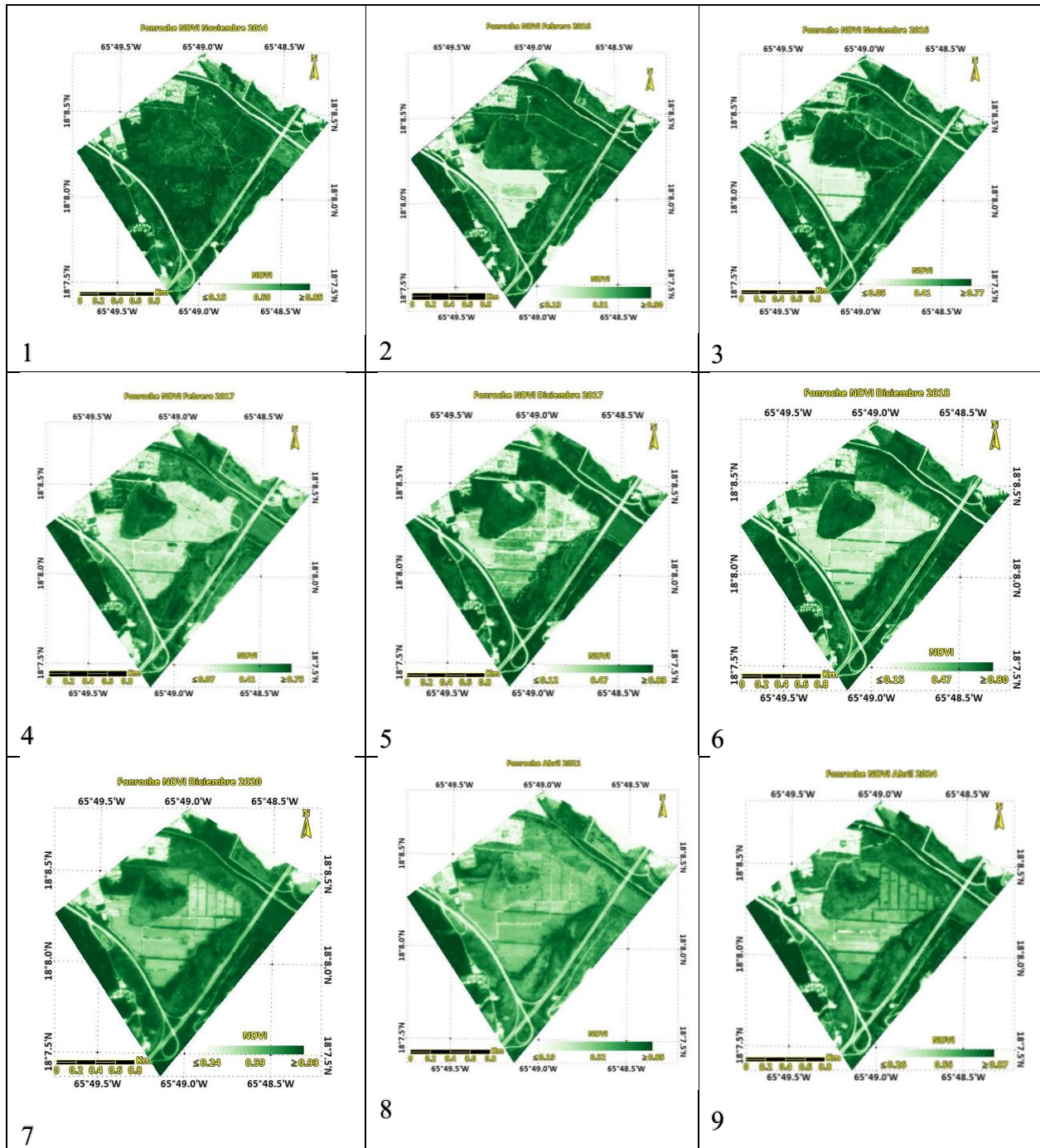


Figura 37. Secuencia de imágenes NDVI antes, durante y después de la construcción de Fonroche: Noviembre 2014 (1), Febrero 2016 (2), Noviembre 2016 (3), Febrero 2017 (4), Diciembre 2017 (5), Diciembre 2018 (6), Diciembre 2020 (7), Abril 2021 (8) y Abril 2024 (9).

Recomendaciones

Para poder determinar con mayor exactitud qué cultivos agrícolas se pueden producir debajo de los paneles, lo mejor es recolectar muestras de estos suelos y analizarlas en un laboratorio para determinar qué nutrientes tienen. La hierba común y los arbustos silvestres son menos exigentes nutricionalmente en comparación a la gran mayoría de los cultivos agrícolas, por lo que el hecho de que éstos logren crecer en estos proyectos luego de su construcción, no asegura que otras plantas o cultivos también lo puedan hacer.

Además, para futuros estudios de cobertura vegetal en proyectos solares industriales, en los que el espacio entre los paneles es de unos pocos pies, lo mejor sería utilizar imágenes satelitales de mayor resolución espacial, preferiblemente de un metro o menos por pixel. El problema es que los sensores que proveen imágenes de esas resoluciones son comerciales o de uso privado, y el costo para adquirir esas imágenes es muy elevado. Las imágenes de Planet son las de mejor resolución espacial entre las que se pueden obtener de manera gratuita. No se puede olvidar el hecho de que las imágenes satelitales no permiten ver lo que hay debajo de los paneles solares. Si se usan imágenes de éste u otros satélites o sensores, el estudio se debe complementar con fotografías de aviones, drones o tomadas por personas en visitas de campo, que muestran mejor lo que hay entre y debajo de los paneles.

Para un próximo estudio, también se podría aplicar una máscara a los paneles solares y los edificios en las imágenes satelitales, para que el NDVI solo tome en consideración el espacio entre ellos.

Referencias

- Energía Estratégica. (2023). Inaugura Ciro One Salinas, el proyecto de placas solares y baterías más grande de Puerto Rico. Recuperado de <https://www.energiaestrategica.com/inaugura-ciro-one-salinas-el-proyecto-de-placas-solares-y-baterias-mas-grande-de-puerto-rico/>
- Global Press Journal (2024). Recuperado de https://globalpressjournal.com/photos/wind-sun-water_5/
- LORD. (s.f.). Humacao Solar. Recuperado de <https://www.lordcg.com/work/humacao-solar>
- National Weather Service. (2024). Rainfall and Temperature Maps for Puerto Rico and U.S. Virgin Islands. Recuperado de https://www.weather.gov/sju/climo_pr_usvi_normals
- Planet Explorer. (2024). Education and Research Program. Planet. Recuperado de <https://www.planet.com/explorer/>
- Santiago, R., Lloréns, H. y De Onís, C. (2022). The Devastating Costs of Puerto Rico's Solar "Farms". Recuperado de <https://nacla.org/puerto-rico-solar-farms>
- Sepúlveda, J. (2024). Comunicación personal.

Toribio, G. (2019). NDVI, ¿qué es y para qué sirve? Recuperado de
<https://www.cursosteledeteccion.com/ndvi-que-es-y-para-que-sirve/>

USDA. (s.f.). Agrivoltaics: Coming soon to a farm near you? Recuperado de
<https://www.climatehubs.usda.gov/hubs/northeast/topic/agrivoltaics-coming-soon-farm-near-you>

Zhang, Y., Tian, Z., Liu, B., Chen, S. y Wu, J. (2023). Effects of photovoltaic power station construction on terrestrial ecosystems: A meta-analysis. Recuperado de
<https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fevo.2023.1151182/full>