**3. Material y métodos**

**3.1 Área de estudio**

El análisis de los flujos de CO2 se ha realizado en cuatro ecosistemas forestales diferentes dentro del Parque Natural de Sierra Nevada, dos situados en la cara norte y dos en la cara sur (Figura de mapa). El primer ecosistema de la cara sur se trata de un pinar de *Pinus xxxx,* que se encuentra localizado cerca del municipio de Pórtugos y el segundo se trata de un robledal de *Quercus xxxx,* localizado cerca del municipio de Cáñar. Por otro lado, en la cara norte tenemos un pinar de *Pinus xxxx,* localizado cerca del municipio de Abrucena y un encinar de *Quercus xxxx*, localizado cerca del municipio de Fiñana. Los cuatro ecosistemas se encuentran en zonas con un clima categorizado entre mesomediterráneo y supramediterráneo, definido por veranos cálidos y secos y precipitaciones concentradas en primavera y otoño (referencia).

FIGURA MEGA CHULA DEL PARQUE Y DE LAS PARCELAS

**3.2 Experimentación in-situ**

Para poder realizar las mediciones de respiración del suelo mediante métodos de cámara, se realizó una instalación de tubos PVC de 20cm de diámetro y 11 cm de alto en febrero de 2022 en los ecosistemas de la cara sur y en abril del mismo año en los de la cara norte. En cada ecosistema se instalaron 18 tubos, dando lugar a 6 grupos con dos tratamiento diferentes. En los pinares tres grupos, por lo tanto, 9 collares, se colocaron encima de suelos con restos de tala (suelo cubierto) y los otros tres grupos sobre suelos descubierto (suelo desnudo). En el robledal y el encinar tres grupos se colocaron encima de suelos cercano a los individuos y cubiertos de hojarasca (suelo cubierto) y los otros tres en suelos donde se había realizado resalveos del robledal previamente (suelo desnudo). Esta disposición de los collares deja como resultado, un diseño experimental ¿de un factor con 3 réplicas y 9 pseudoreplicas por tratamiento en cada ecosistema? en el que se puede observar el efecto de las variaciones antropogénicas de carbono orgánico del suelo en la respiración y, concretamente, el flujo de CO2 de este.

Las campañas de medidas se han realizado cada dos semanas a partir del día 9 de marzo de 2022 en los ecosistemas de la cara sur y a partir de del día x de mayo en los de la cara norte hasta el día x de mayo de 2023 en los cuatro ecosistemas. Para este estudio se han usado datos a partir del primer día de registros de los ecosistemas de la cara norte para disponer así del mismo año natural de mediciones en todos los ecosistemas.

Como se ha detallado en la introducción, el mejor método para medir la respiración del suelo es mediante métodos de cámara junto con un analizador de gases por infrarrojo (IRGA). Es por ello, que las mediciones in-situ de este estudio se han realizado con una cámara (8200-01S, *Smart Chamber*, Li-Cor, Lincoln, NE, USA), un analizador de gases por infrarrojos (LI-7810, Li-Cor, Lincoln, NE, USA) y el software de procesado de datos asociado a estos dos instrumentos, *Soil Flux Pro.*

3.2.1 Smart Chamber

La Smart Chamber es una cámara de sondeo portátil, alimentada por batería, con GPS y Wi-Fi, que realizar mediciones del flujo de gas del suelo. Presenta un software de procesamiento de flujo integrado, almacenamiento interno y una sonda de humedad y temperatura del suelo para la recopilación de datos auxiliares. Puede configurarse con analizadores de gases LI-COR o de otros fabricantes para realizar mediciones de flujo en tiempo real (referencia).

Las mediciones se realizan colocando la cámara encima de los collares PVC previamente instalados, de forma que el área de suelo que estos ocupan será la analizada. Las recomendaciones del fabricante indican que los collares deben sobresalir un mínimo de 2 centímetros del suelo y no más de 3 cm ya que una excesiva altura de estos provocaría un sombreado que puede afectar las condiciones de temperatura y humedad del suelo (referencia). Así mismo, estas recomendaciones no indican la duración exacta que debe tener una medición, ya que la idoneidad de esta varía según el tipo de suelo, pero si sugiere una duración aproximada, que es entre 90 y 180 segundos. Esta duración se basa en el objetivo de mantener los cambios de concentración de gas tan pequeños como sea posible ya que hay estudios de modelos de difusión que han demostrado que las cámaras pueden alterar los gradientes de concentración de gases en el suelo, lo cual daría lugar a errores en las estimaciones de flujo (referencia). En nuestro caso, se realizaron mediciones de 110 segundos.

Por último, otro aspecto a tener cuenta según el fabricante es el “offset” del collar, término que hace referencia a la altura de este y que es necesario para determinar el volumen de aire dentro del cuello del suelo, que a su vez se utiliza para calcular el volumen total del sistema. El volumen total del sistema es un parámetro importante del cálculo del flujo, por lo que debe determinarse con la mayor precisión posible. Esta altura puede ser altamente variable dentro de cada collar debido a la pendiente o la irregularidad del suelo, por lo tanto, siguiendo las indicaciones del fabricante, se midió dicha distancia en cuatro zonas de cada collar y finalmente se obtuvo el promedio.

3.2.2. Analizador de gases traza LI-7810

El analizador de gases traza LI-7810 CH4/CO2/H2O es un analizador basado en láser de alta precisión y estabilidad que utiliza la espectroscopia de absorción mejorada por cavidad y realimentación óptica (OF-CEAS). El analizador mide y almacena en su memoria interna fracciones molares secas de CH4 y CO2 del aire corregidas tanto por las interferencias espectroscópicas como por la dilución debida al H2O. (referencia)

La cámara se conecta al analizador mediante la entrada de aire de este. Cuando se empieza una medición, el aire se introduce de la cámara al analizador a través de la entrada, fluye a través del banco óptico y el ajustador de fase y se expulsa por la salida de aire. El banco óptico está formado por tres espejos altamente reflectantes dispuestos en forma de “V”. Estas características ayudan a que cuando el analizador inyecta luz laser en el interior para medir la concentración de los gases, los fotones puedan circular más tiempo a través del medio activo antes de escapar y golpear el fotodiodo. De esta forma se consigue una mayor longitud de trayectoria efectiva que logra mejorar la sensibilidad ya que el gas que fluya a través de la cavidad tendrá más oportunidades de absorber la luz. (referencia).

**3.3 Experimentación satelital**

Para realizar la parte satelital del experimento hemos usado los productos de dos misiones satelitales diferentes, SENTINEL-2 y Landsat 8. Estos productos han sido obtenido a través de GOOGLE EARTH ENGINE

3.3.1 SENTINEL-2

La misión Copernicus SENTINEL-2 comprende una constelación de dos satélites idénticos (SENTINEL-2ª Y SENTINEL-2B) de órbita polar situados en la misma órbita heliosincrónica, en fase de 180° entre sí. Su objetivo es monitorear la variabilidad de las condiciones de la superficie terrestre mediante su gran anchura de barrido (290 km) y su rápido tiempo de revisita (10 días en el ecuador con un satélite, y 5 días con 2 satélites en condiciones de ausencia de nubes, lo que se traduce en 2-3 días en latitudes medias). Los SENTINEL-2 llevan consigo un instrumento ópticos multiespectral (MSI) que muestrea 13 bandas espectrales a diferentes resoluciones espaciales.

El instrumento multiespectral (MSI) utiliza un sensor con el concepto de "escoba de empuje" (“push broom”) que consiste en recopilar filas de imágenes a lo largo de la franja orbital y utilizar el movimiento de avance de la nave espacial a lo largo de la trayectoria de la órbita para añadir nuevas filas a su adquisición. La luz reflejada hacia el instrumento MSI desde la Tierra y su atmósfera es recogida por un telescopio de tres espejos (M1, M2 y M3) y enfocada, mediante un divisor de haces, hacia dos conjuntos de plano focal (FPA): uno para las diez longitudes de onda visible e infrarrojo cercano (VNIR) y otro para las tres longitudes de infrarrojos de onda corta (SWIR). Ambos FPAs están compuestos por 12 detectores escalonados en dos filas horizontales. (figura?)La separación de las bandas electromagnéticas individuales VNIR y SWIR se consigue mediante filtros de banda superpuestos a los detectores. Las bandas se pueden observar en la siguiente tabla con la respectiva resolución espacial que se pueden conseguir. (TABLA).

Mediante SENTINEL-2 hemos obtenido 4 índices diferentes derivados de medidas multiespectrales realizadas por el satélite: NDVI, EVI, LSWI y NDWI.

NDVI

El índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI, en inglés) es un índice usado para estimar la cantidad, calidad y desarrollo de la vegetación. Los índices de vegetación son combinaciones de bandas espectrales, cuya función es realzar la contribución de la vegetación en función de la respuesta espectral de una superficie y atenuar la de otros factores como suelo, iluminación i/o atmósfera.

Todos los organismos fotosintéticos contienen uno o más pigmentos capaces de absorber la radiación visible que iniciaría las reacciones fotoquímicas y fotosintéticas. Dos bandas del espectro, la azul (430 nm) y la roja (58-68nm) muestran la cantidad de energía absorbida por las plantas; en contraste, la banda del infrarrojo cercano (725-1100nm) (región invisible para el ojo humano) actúa justo de forma inversa. La mayor absorción del rojo y azul, junto con la fuerte reflexión del infrarrojo cercano es la diferencia espectral de la respuesta de toda la vegetación, y ha sido usado durante mucho tiempo como forma de diferenciación de las superficies con y sin vegetación.

La vegetación verde y vigorosa refleja mucho menos en la banda visible roja (banda 1), región de absorción de la clorofila, que en la banda cercana infrarroja (banda 2), región de alta reflectancia del componente celulósico. Cuando la vegetación sufre stress, los valores de la banda 1 aumentan y los de la banda 2 decrecen. Estas propiedades llevaron a definir varios índices de vegetación basados en operaciones algebraicas entre las bandas 1 y 2. Uno de los algoritmos más conocidos es el del llamado Índice Diferencial de Vegetación Normalizado (NDVI) que se define como:

NDVI = (banda 2 – banda 1)/(banda 2 + banda 1).

El intervalo de valores obtenido del NDVI, varía entre (-1) y el (+1). Sólo los valores positivos corresponden a zonas de vegetación. Los valores negativos, generados por una mayor reflectancia en el visible que en el infrarrojo, pertenecen a nubes, nieve, agua, zonas de suelo desnudo y rocas.

EVI

El índice de vegetación mejorado (EVI, en inglés) de Landsat es similar al índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) y puede utilizarse para cuantificar el verdor de la vegetación. Sin embargo, el EVI corrige algunas condiciones atmosféricas y el ruido de fondo del conjunto de copas de los árboles y es más sensible en zonas con vegetación densa. El EVI se define como:

EVI = G\*(NIR-Red)/(NIR + C1 \* Red – C2 \* Blue + L)

En esta ecuación, NIR, rojo y azul son reflectancias de superficie corregidas atmosféricamente y parcialmente corregidas atmosféricamente (absorción de Rayleigh y ozono). L es el ajuste del ruido fondo de las copas que tiene en cuenta la transferencia radiante no lineal y diferencial del NIR y el rojo a través del conjunto de copas arbóreas. C1 y C2 son los coeficientes del término de resistencia a los aerosoles, que utiliza la banda azul para corregir las influencias de los aerosoles en la banda roja. Por último, G es un factor de ganancia.

Los coeficientes adoptados en SENTINEL-2 son: L=1, C1 = 6, C2 = 7,5, y G = 2,5 y las bandas utilizadas son…

LSWI

El índice del agua en la superficie terrestre (LSWI), como su nombre indica, se usa para monitorear el nivel de agua presente en la vegetación y el suelo. Para calcularlo se utiliza las regiones infrarroja de onda corta (SWIR) y infrarrojo cercano (NIR) del espectro electromagnético y que el agua líquida absorbe mucha luz en la región SWIR. El LSWI se define como:

LSWI = (NIR – SWIR)/(NIR + SWIR)

El intervalo de valores obtenidos de LSWI varía entre -1 y +1. Un esquema de intensidad de sequía basado en este índice está dividido en cuatro grupos: sequía extrema y excepcional (LSWI ≤ −0.1), sequía severa y moderada (−0.1 < LSWI ≤ 0), sequía anormal (0 < LSWI ≤ 0.1), y ausencia de sequía (LSWI > 0.1) (Bajgain, R., 2015)

NDWI

El índice de agua de diferencia normalizada (NDWI) se utiliza para resaltar la presencia de las masas de agua en una imagen de satélite. Para ello, se reduce considerablemente la reflectancia del suelo y la vegetación, lo que permite que dichas masas de agua “destaquen” en la imagen. Se calcula utilizando la combinación Verde-NIR (verde visible e infrarrojo cercano) ya que las longitudes de onda del verde visible maximizan la reflectancia habitual de la superficie del agua mientras que, por otro lado, las longitudes de onda del infrarrojo cercano maximizan la alta reflectancia de la vegetación terrestre y las zonas de suelo a la vez que minimizan la baja reflectancia de las masas de agua. El NDWI aprovecha estas propiedades para perfilar con éxito las masas de agua en el mapa y controlar la turbiedad del agua. La fórmula del NDWI es la siguiente:

NDWI = (Verde – NIR)/(Verde + NIR)

En el caso de SENTINEL-2:

NDWI= (Band 3 – Band 8)/(Band 3 + Band 8)

Los valores de las masas de agua son superiores a 0,5, mientras que la vegetación tiene valores mucho más pequeños, lo que permite distinguir más fácilmente la vegetación de estas. Los elementos construidos tienen valores positivos entre cero y 0,2. Según Los valores del NDWI se pueden establecer los siguientes rangos: superficie del agua (NDWI > 0,2), inundación o humedad (0 < NDWI < 0,2), sequía moderada o superficies sin agua (-0,3 < NDWI < 0) y sequía o superficie sin agua (-1 < NDWI < -0,3) (referencia).

Albedo

El albedo de la superficie terrestre, es decir, la fracción del flujo radiativo reflejado por una superficie a la atmósfera, es una variable fundamental para estimar el balance energético global de la superficie. Se encuentra estrechamente relacionado con varios ciclos biogeoquímicos e hidrológicos, ya que el flujo radiante absorbido impulsa los procesos de fotosíntesis de las plantas, el crecimiento de la vegetación y la evapotranspiración. La fórmula para calcular el albedo es la siguiente:

Albedo = ((0.1836 \* Blue) + (0.1759 \* Green) + (0.1456 \* Red) + (0.1347 \* RedEdge1) + (0.1233 \* RedEdge2) + (0.1134 \* RedEdge3) + (0.1001 \* NIR) + (0.0231\* SWIR1) + (0.0003 \* SWIR2))

En el caso de Sentinel-2:

Albedo = ((0.1836 \* Blue) + (0.1759 \* Green) + (0.1456 \* Red) + (0.1347 \* RedEdge1) + (0.1233 \* RedEdge2) + (0.1134 \* RedEdge3) + (0.1001 \* NIR) + (0.0231\* SWIR1) + (0.0003 \* SWIR2))

Los valores del albedo que puede tener una superficie varían entre 0 y 1, siendo 0 una superficie que absorbe todo el flujo radiativo y 1 una superficie que lo refleja todo.

3.3.2 LANDSAT-9

Landsat 9 es fruto de la colaboración entre el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS) y la Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio (NASA), y continúa la función esencial del programa Landsat de repetir observaciones mundiales para vigilar, comprender y gestionar los recursos naturales de la Tierra. El satélite lleva consigo dos instrumentos científicos, el Operational Land Imager 2 (OLI-2) y el Thermal Infrared Sensor 2 (TIRS-2).

En nuestro caso, solo hemos obtenido datos del segundo instrumento, el TIRS-2. Este El sensor TIRS-2 recoge datos de imágenes de dos bandas térmicas con una resolución espacial de 100 m en una anchura de barrido de 185 km. El TIRS-2 es un sensor “push-broom” que emplea un plano focal con largas matrices de detectores fotosensibles. Concretamente utiliza fotodetectores infrarrojos de pozo cuántico (QWIPs) que mide la energía infrarroja térmica de onda larga emitida por la superficie terrestre, cuya intensidad es función de la propia temperatura de la superficie. Los QWIPs son sensibles a dos bandas de longitud de onda del infrarrojo térmico, lo que permite separar la temperatura de la superficie terrestre de la de la atmósfera. El diseño de los QWIPs funciona según los complejos principios de la mecánica cuántica. Los chips semiconductores de arseniuro de galio atrapan electrones en un "pozo" de energía hasta que son elevados a un estado superior por una luz infrarroja térmica de cierta longitud de onda. Los electrones elevados crean una señal eléctrica que puede leerse, grabarse, traducirse a unidades físicas y utilizarse para crear una imagen digital.

Mediante LANDSAT-9 hemos obtenido 1 índice derivado1 de medidas multiespectrales realizadas por el satélite: Thermal.

Thermal

Este índice es básicamente la temperatura de la superficie terrestre que registra el TIRS-2 mediante la metodología previamente explicada. Se obtiene directamente con la banda 10 del satélite.