

UNIVERSIDAD PÚBLICA DE NAVARRA

TRABAJO DE FIN DE MASTER

Trabajo de Investigación presentado para optar a la
Maestría Científica en Tecnologías de Energías Renovables;
Convenio UMSS - UPNA

**Análisis comparativo de los programas WASP y Openwind en los casos de estudio de los
parques eólicos Qollpana (Bolivia) y El Perdón (España)**

Mariel Suarez Suarez

Dirigido por
María Almudena García Gorostiaga
Alberto Royo Romeo

Supervisor:
Joseph Adhemar Araoz Ramos
Rober Mamani Camacho

Mayo 2019

The logo for the Universidad Pública de Navarra (UPNA) consists of the lowercase letters 'upna' in a red, sans-serif font. The letters are lowercase and have a modern, clean design.

Universidad Pública de Navarra
Nafarroako Unibertsitate Publikoa

Quiero expresar mis agradecimientos:

A Almudena y Alberto, por haberme guiado y acompañado en este proceso.

A Rober y Adhemar, por brindarme su apoyo.

A Kabir mi novio, por su apoyo incondicional e invaluable.

A mi mamá Elsa y hermana Iris, por todo lo que les debo.

A la UPNA, por acogerme en sus aulas.

A la UMSS, por brindarme la oportunidad de realizar el master.

ÍNDICE GENERAL

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Antecedentes.....	2
1.2. Planteamiento del problema.....	4
1.3. Objetivos.....	4
1.3.1. Objetivo General.....	4
1.3.2. Objetivos Específicos.....	4
1.4. Justificación.....	4
2. MARCO TEÓRICO.....	5
2.1. Energía eólica y viento.....	5
2.1.1. Contenido energético en el viento.....	6
2.1.2. Perfil vertical del viento.....	8
2.1.3. Descripción estadística del viento: Distribución Weibull.....	8
2.1.4. Curva de potencia.....	9
2.1.5. Rosa de Viento.....	10
2.1.6. Predicción de velocidad de viento.....	10
2.2. Programas.....	10
2.2.1. Programa WAsP.....	11
2.2.2. Herramientas de WAsP.....	13
2.2.3. Programa Openwind.....	15
3. METODOLOGÍA.....	17
3.1. Adecuación de la información de entrada.....	17
3.2. Entrada de información al programa de WAsP y Openwind.....	19
3.3. Procesado de información para el análisis de los resultados generados.....	21
4. RESULTADOS.....	23
4.1. Análisis comparativo de mapas.....	23
4.1.1. Mapa de velocidad.....	23
4.1.2. Mapa de elevación.....	26
4.2. Reportes en WAsP y Openwind.....	28
4.2.1. Reporte de energía.....	28
4.2.2. Reporte de densidad de potencia.....	30
4.2.3. Reporte de Índice RIX.....	31
4.2.4. Reporte de optimización.....	34
5. CONCLUSIONES.....	35
6. BIBLIOGRAFÍA.....	36
ANEXO.....	38

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Mapa de ubicación del parque eólico Qollpana	2
Figura 2 Mapa de ubicación parque eólico El Perdón	3
Figura 3 Brisas Marinas	5
Figura 4 Vientos de montaña	6
Figura 5 Vientos según la topografía	6
Figura 6 Curva de densidad de probabilidad de Weibull para un rango de valores de K.....	8
Figura 7 Curva de potencia teórica de un aerogenerador(Wagner & Mathur, 2009)	9
Figura 8 Interfaz de WAsP	13
Figura 9 Interface WAsP Climate Analysis	14
Figura 10 Interface de WAsP Map Editor	14
Figura 11 Interfaz de Openwind	15
Figura 12 Curva Weibull y rosa de viento parque Qollpana	17
Figura 13 Rosa de viento y curva Weibull parque El Perdón.....	17
Figura 14 Ambiente de trabajo en WAsP y Openwind.....	19
Figura 15 Herramienta para calcular la densidad de WAsP	19
Figura 16 Curva de potencia de GW 77/1500 y curva modificada por efecto de la altura.....	20
Figura 17 Curva de Potencia ENERCON E82E4 y curva modificada por efecto de la altura 20	
Figura 18 Curva de potencia ENERCON E-40 y curva modificada	21
Figura 19 Valores del mapa de velocidad de WAsP.....	21
Figura 20 Mapa de Velocidad del parque eólico Qollpana generado por WAsP	23
Figura 21 Leyenda de velocidad de viento del programa WAsP.....	23
Figura 22 Mapa de Velocidad del parque eólico Qollpana generado por Openwind.....	24
Figura 23 Leyenda de Openwind.....	24
Figura 24 Velocidad de viento del parque eólico el Perdón en WAsP y Openwind	25
Figura 25 Elevación de terreno para parque eólico Qollpana en WAsP y Openwind.....	26
Figura 26 Elevación de terreno para parque eólico El Perdón en WAsP y Openwind.....	27
Figura 27 AEP para el área del parque eólico Qollpana.....	28
Figura 28 AEP para el área del parque eólico El Perdón.....	29
Figura 29 Densidad de Potencia para el área del parque eólico Qollpana.....	30
Figura 30 Densidad de Potencia para el área del parque eólico El Perdón.....	31
Figura 31 Índice de RIX para el parque eólico Qollpana	31
Figura 32 Índice de RIX del parque eólico El Perdón	32
Figura 33 Comparación parque eólico Qollpana vs optimización de turbinas	34
Figura 34 Comparación del parque El Perdón vs Optimización de turbinas.....	34

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Producto de Openwind básico Vs empresa.....	16
Tabla 2 Valores de rugosidad de terreno	18
Tabla 3 Estructura de mapas generados.....	21
Tabla 4 Comparativa de velocidades	25
Tabla 5 Comparativa de elevación de terreno.....	27
Tabla 6 Energía bruta y neta para el parque eólico Qollpana	28
Tabla 7 Energía bruta y neta para el parque eólico El Perdón.....	29
Tabla 8 Ubicación de aerogeneradores y valores del Índice de RIX.....	32
Tabla 9 Ubicación de aerogeneradores con valores de Índice de RIX	33

1. INTRODUCCIÓN

El uso de la energía eólica data desde la antigüedad, cuando se empleaba para impulsar barcos de vela. La energía eólica es identificada como un recurso renovable, y es una fuente de mayor crecimiento que produce energía eléctrica utilizando turbinas eólicas. La ventaja de este tipo de sistemas de conversión de energía eólica en eléctrica son el aspecto económico y por ser respetuoso con el medio ambiente (Shoaib, Siddiqui, Rehman, Khan, & Alhems, 2019).

Durante los últimos 30 años, la energía eólica se convirtió en un actor importante en la generación eléctrica en todo el mundo, pasando de 1.3 GW en 1986 a aproximadamente 490 GW (agregado mundial) para 2016 (durante este periodo, el consumo mundial de electricidad ha aumentado de 8978 TW a 21.1919 TWh) de los cuales 140 GW corresponden a la Unión Europea (UE) (Rosales Asensio, Borge Diez, Blanes Peiró, Pérez Hoyos, & Comenar Santos, 2019).

La UE estableció, para el año 2020 cinco objetivos ambiciosos en las materias de empleo, innovación, educación, integración social y clima o energía. Ahondando en el tema de energía, consiste en situar las emisiones de gases de efecto invernadero un 20% (o incluso 30%) por debajo de los niveles de 1990, generar el 20 % de las necesidades energéticas de fuentes renovables y aumentar la eficiencia energética a un 20% (Barroso, 2012). En el caso español en el área de energías renovables se destacan tres etapas diferentes:

- Hasta la década de 1990, las energías renovables fueron aprobadas tímidamente por el gobierno español
- Entre 1990 y el comienzo de la crisis financiera mundial, su promoción fue bastante explosiva.
- Desde 2008, el apoyo político (es decir, los subsidios públicos) ha disminuido considerablemente. (Bianco, Driha, & Sevilla-Jiménez, 2019)

Por su parte, los países en vías de desarrollo como Bolivia, actualmente están desarrollando planes para cambiar su matriz energética. Según el plan Eléctrico del Estado Plurinacional de Bolivia 2025, la matriz energética boliviana está constituida por el 68.6% de generación térmica (gas natural y diésel), 30.1% de generación hidroeléctrica y 1.3% de generación con energías alternativas, entre las que se destacan la biomasa, según datos de 2013 (Espinasa, Sucre, Gutiérrez, & Anaya, 2017).

A la fecha, Bolivia tiene una serie de proyectos para la inserción de energía eléctrica de fuentes renovables al Sistema Interconectado Nacional (SIN), esto con el fin de cubrir la demanda energética actual. En el ámbito de la energía eólica, cuenta con el primer parque eólico Qollpana de potencia nominal de 27 MW, además se está implementado otros en el oriente boliviano, y adicionalmente elaboran proyectos para la implementación en otras zonas del país. Sin duda Bolivia se encuentra en la fase inicial de implementación energías renovables en su matriz energética.

Este proceso de transición hacia la sustitución de combustibles fósiles con energías renovables es el nuevo reto en Bolivia, y que requiere de estudios, investigaciones y propuestas para el diseño e implementación de futuros parques eólicos, a objeto de realizar una adecuada planificación. En este caso específico, la investigación plantea el uso de herramientas para la planificación de parques eólicos. Para tal efecto, se realiza un análisis comparativo de los

resultados de dos programas que sirven para el diseño de parques eólicos que son WAsP y Openwind, en los casos de estudio del parque eólico Qollpana (Bolivia) y el Perdón (España).

1.1. Antecedentes

El primer parque eólico en Qollpana (Bolivia) se encuentra situado en el departamento de Cochabamba. La implementación del parque eólico fue realizada en dos fases, la primera fase del parque (instalada el año 2014) está compuesta por dos aerogeneradores cuyo modelo es GW 77/1500 de 1.5 MW cada una, con una capacidad total de 3MW. La segunda fase fue instalada en el año 2016 con la disposición adicional de 8 aerogeneradores, cuyo modelo es E82-E4 3000 con una capacidad unitaria de 3 MW. Actualmente la capacidad instalada de la planta eólica es de 27 MW (ENDECORANI, 2017).

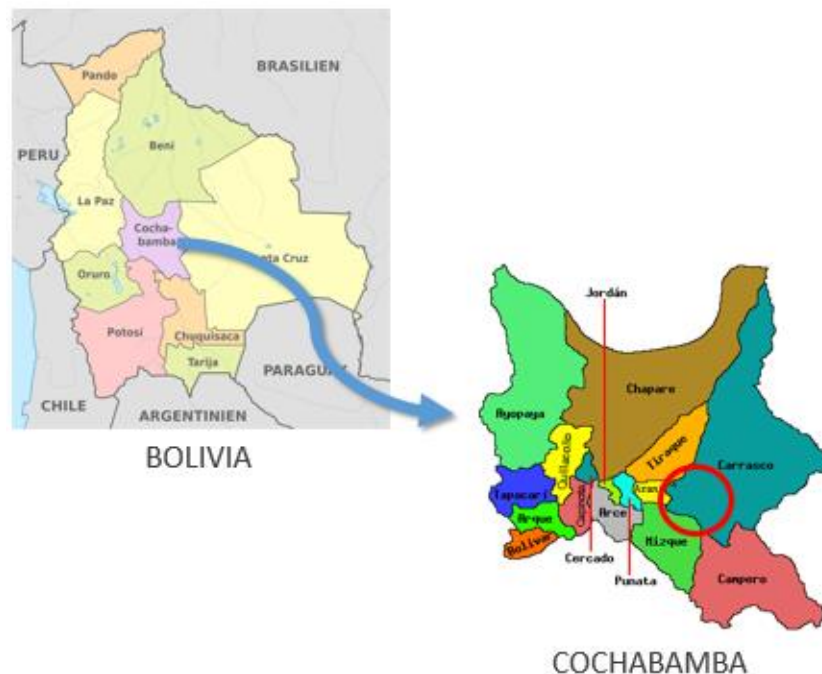


Figura 1 Mapa de ubicación del parque eólico Qollpana

Con respecto al parque eólico El Perdón, este también fue implementado en dos fases, la primera fase en el año 1994, con una instalación de seis aerogeneradores de 500 kW de potencia cada uno. La segunda fase consistió en la ejecución de 34 aerogeneradores hasta totalizar 20 MW de potencia conjunta. El modelo instalado de Gamesa G-39 tiene las características de tener diámetro del rotor de 39 m, una altura de torre de 40 m (Lago, 1997). Datos importantes recolectados son que las emisiones CO2 evitadas son de 61.156 ton/año (en centrales térmicas de carbón), una depuración atmósfera como 3,1 millones de árboles. Así mismo al ser uno de los primeros parques eólicos, cientos de entidades y expertos se acercaron para tratar de replicar el modelo en sus regiones o países de origen (Acciona, 2014).

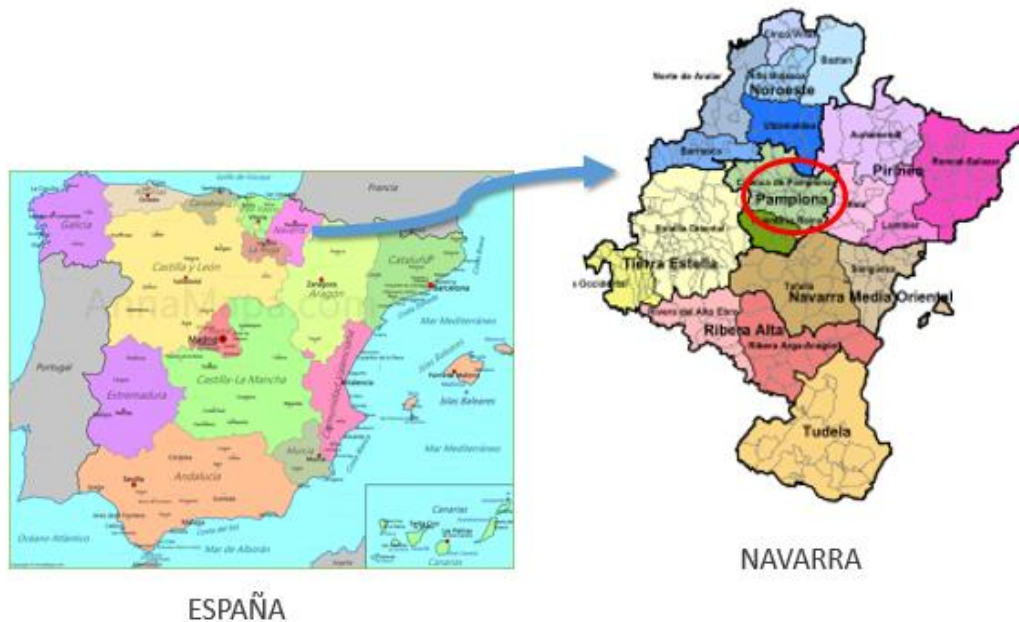


Figura 2 Mapa de ubicación parque eólico El Perdón

En este contexto las metodologías utilizadas para el diseño de parques eólicos en la investigación son los programas WASP con licencia y programa Openwind la versión gratuita. La información requerida para implementar a los programas es topografía, datos de viento y rugosidad. En este sentido es importante destacar que para el parque eólico El Perdón la información de entrada al programa es de acceso libre y gratuito en la página web del Gobierno de Navarra. El parque eólico El Perdón se encuentra instalado en la sierra del Perdón, esta es una zona donde el viento se presenta con una elevada frecuencia y con una velocidad media alta, dos requisitos indispensables para desarrollar un parque eólico. El perdón es un monte situado a 10 Km al sur de la capital de Pamplona.

Para el parque eólico Qollpana la información de entrada a los programas no es de fácil acceso. Este parque cuenta con estaciones de medición de datos de viento, sin embargo los históricos a dichos datos no son de acceso público. Por tanto para este estudio se utilizaron series de datos generados por el programa WRF. En cuanto a los mapas topográficos se puede acceder a mapas en Bolivia los cuales tienen costo, por tanto la otra opción es descargar mapas elaborados mediante imágenes satelitales. Y finalmente para realizar los mapas de rugosidad se lo hizo en base a imagen satelital, esto debido a que no se cuenta.

En este contexto se puede considerar que en países en vías de desarrollo como Bolivia no se cuenta con información de libre acceso y que son imprescindibles para el diseño de parques eólicos y en algunos casos carecen de información del área donde se desea realizar estudios académicos. Contrariamente en España, específicamente en Navarra se tiene mayor acceso a información, lo que permite lograr que los estudios realizados en estas zonas sean representativos y tengan mayor impacto.

1.2. Planteamiento del problema

Bolivia se encuentra en fase inicial en la implementación de energías renovables en su matriz energética, cuenta con un alto potencial eólico y extensiones de terreno disponibles para la implementación de parques eólicos, sin embargo, carecen de herramientas para realizar una planificación adecuada. La presente investigación se plantea realizar la comparación de los programas WAsP y Openwind utilizados para la planificación de parques eólicos, en dos casos de estudio el parque eólico Qollpana (Bolivia) y El Perdón (España).

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

Comparar los programas WAsP y Openwind en los casos de estudio de los parques eólicos Qollpana (Bolivia) y El Perdón (España).

1.3.2. Objetivos Específicos

- Contrastar los mapas generados por los programas WAsP y Openwind para los parques eólicos Qollpana y El Perdón.
- Describir y comparar los reportes generados por los programas WAsP y Openwind para los parques eólicos Qollpana y El Perdón.

1.4. Justificación

Este estudio realiza la comparación de los programas de WAsP y Openwind en los casos de estudios, que son el parque eólicos Qollpana y El Perdón. La importancia radica en que es necesario disponer de información cualitativa y cuantitativa de parques eólicos que están en funcionamiento, ya que actualmente se carece de estudios de evaluación de estas herramientas en Bolivia, que orienten a realizar una adecuada planificación para la implementación de nuevos parques eólicos. Es por esto que resulta relevante visibilizar este estudio, analizar esta temática y sentar las bases para que a futuro se pueda proponer nuevos proyectos parques eólicos en diferentes territorios de Bolivia.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Energía eólica y viento

La energía eólica se refiere a la energía cinética que presentan las masas de aire en movimiento. La misma se considera como una nueva tecnología de generación renovable más importante a nivel mundial. En su mayoría es energía eólica terrestre, pero el sector marítimo está creciendo con rapidez. Las turbinas eólicas utilizan palas de rotor y un generador de electricidad para convertir energía cinética del aire en movimiento en energía eléctrica (SBS Energy Institut, 2013).

El viento fluye de las regiones de mayor presión a regiones de menor presión. Cuanto mayor sea la gradiente de presión atmosférica, mayor será la velocidad del viento, por lo tanto, mayor será la energía eólica que se puede capturar del viento mediante la maquinaria de conversión de energía eólica. La generación y el movimiento del viento son complicados debido a una serie de factores más importantes son el calentamiento solar desigual, el efecto Coriolis provocado por la auto rotación de la tierra y las condiciones geográficas locales (Tong, 2010). Son diferentes los factores que interfieren en el sentido de los vientos locales, entre ellos se destacan las brizas de mar y vientos de montaña.

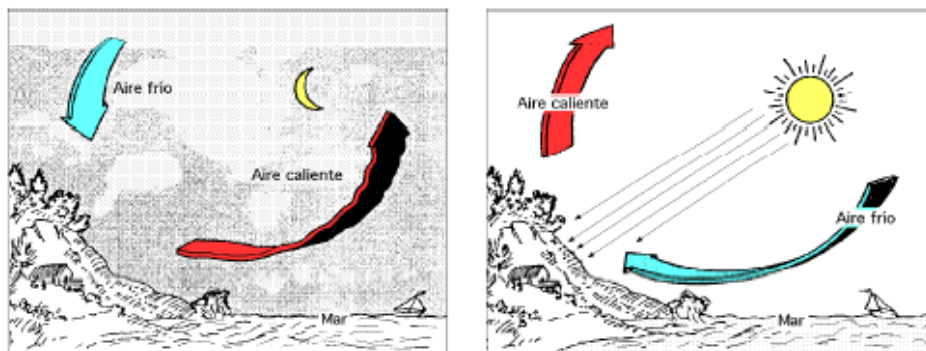


Figura 3 Brisas Marinas

Las masas de tierra son calentadas por el sol más rápido que el agua del mar durante el día, por tanto el aire se eleva, fluye hacia el mar y crea una baja presión a nivel del suelo que atrae el aire frío del mar, conociéndose como brisa marina. Al caer la noche hay a menudo un período de calma cuando la tierra y las temperaturas del mar son iguales. Por la noche el viento sopla en la dirección opuesta. La brisa de la tierra en la noche tiene generalmente velocidades más bajas del viento, porque la diferencia de la temperatura entre la tierra y el mar es más pequeña por la noche (Krohn, 2002).

Las regiones de montaña muestran muchos patrones climáticos interesantes. Un ejemplo es el viento del valle que se origina en las laderas orientadas hacia el sur, en el hemisferio sur. Cuando el aire en las pendientes se calienta, la densidad del aire disminuye y el aire asciende hacia la cima siguiendo la superficie de la pendiente. Por la noche, la dirección del viento se invierte y se convierte en un viento en pendiente descendente.

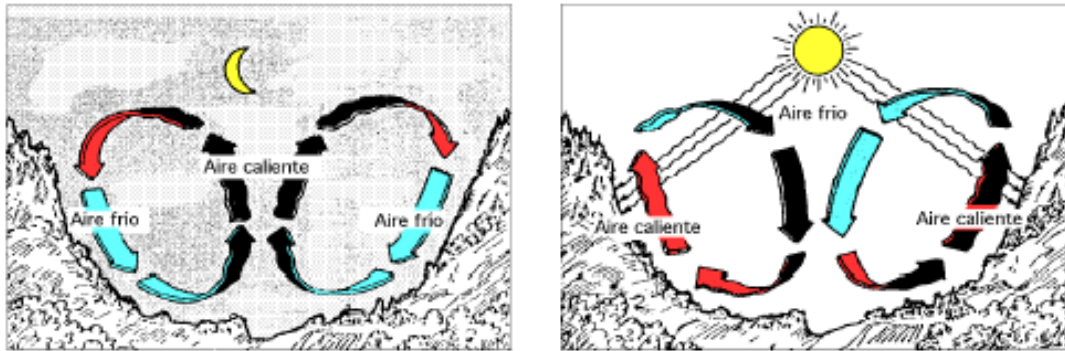


Figura 4 Vientos de montaña

Si la superficie del valle está inclinado, el aire puede moverse hacia abajo o subir el valle, como un viento de cañón. Los vientos que fluyen por los lados de sotavento de las montañas pueden ser bastante potentes (Krohn, 2002)

<p>Crestas orientadas perpendicularmente a la dirección predominante del viento</p>	<p>Altas elevaciones dentro de un área determinada</p>	<p>Lugares donde los vientos locales tienen efecto de embudo</p>

Figura 5 Vientos según la topografía

El estudio de la topografía lo que busca es identificar características que puedan experimentar una mayor velocidad media del viento que el entorno general. Este proceso es especialmente importante para áreas que contienen poco o ningún dato histórico de velocidades del viento, Las características que muestran que probablemente el área será más ventosas (AWS scientific, 1997).

2.1.1. Contenido energético en el viento

La turbina eólica obtiene su potencia de entrada al convertir la fuerza del viento en un torque o fuerza de giro que actúa sobre las palas del rotor. La cantidad de energía que el viento transfiere al rotor depende de la densidad del aire, el área del rotor y la velocidad del viento (Shoaib et al., 2019).

La energía cinética de un cuerpo en movimiento es proporcional a su masa. La energía cinética en el viento depende, por lo tanto, de la densidad del aire, es decir, de su masa por unidad de volumen. Mientras más pesado es el aire, más energía recibe la turbina. Además de su dependencia de la temperatura, la densidad disminuye ligeramente al aumentar la humedad. En altitudes elevadas (en montañas), la presión del aire es más baja y el aire es menos denso (Shoaib et al., 2019).

El área del rotor determina la cantidad de energía que una turbina eólica puede recoger del viento. Si el diámetro del rotor se duplica, se obtiene un área que es cuatro veces más grande, esto significa que se obtendrá cuatro veces más potencia de salida del rotor (Shoaib et al., 2019). La energía en el viento está en forma de energía cinética, que se caracteriza por la siguiente ecuación:

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2$$

Ecuación 1

Donde m es la masa del aire, y v es la velocidad media del viento durante un periodo de tiempo adecuado. La energía eólica se puede obtener al diferenciar la energía cinética en el viento con respecto al tiempo de la siguiente manera:

$$P_w = \frac{dE_k}{dt} = \frac{1}{2}mv^2$$

Ecuación 2

Como solo una pequeña parte de la energía eólica se puede convertir en energía eléctrica, cuando el viento pasa a través de un aerogenerador e impulsa las palas para girar, la masa correspondiente de viento es igual a la densidad, el área de las palas y la velocidad. Obteniendo como resultados la siguiente ecuación:

$$P_w = \frac{1}{2}\rho Av^3$$

Ecuación 3

Esta ecuación requiere una mayor velocidad del viento a una mayor longitud de las palas para obtener un área barrida más grande y una mayor densidad del aire. Debido a que la salida de energía eólica es proporcional a la potencia cúbica de la velocidad media del viento, una pequeña variación en la velocidad del viento puede resultar un gran cambio en la energía eólica (Tong, 2010) .

El límite de Betz es un límite teórico superior en la producción de energía de una turbina cuyas palas barren un área determinada $c_p=16/27$. El límite se expresa como un coeficiente de potencia del rotor máximo. Los aerogeneradores aspiran a alcanzar este coeficiente de potencia, pero en la práctica se quedan cortos por varias razones (Vennell, 2013).

$$P_w = \frac{1}{2}\rho Av^3 c_p$$

Ecuación 4

Este límite establece que el comportamiento energético óptimo de un sistema ideal, tiene lugar cuando el sistema desacelera la velocidad del viento hasta 2/3 de la velocidad del viento del flujo inalterado aguas arriba (Cuerva & Sanz-Andrés, 2005).

2.1.2. Perfil vertical del viento

Una manera de representar el perfil vertical del viento es la que se muestra en la ecuación 5, esta es esencialmente útil a condiciones de equilibrio atmosférico neutro.

$$V_z = V_{ref} \left(\frac{Z}{Z_{ref}} \right)^\alpha$$

Ecuación 5

Donde:

V_z : Velocidad del viento a estimar a una altura Z sobre el nivel del suelo

V_{ref} : Velocidad de referencia, velocidad del viento observada a una altura preestablecida, denominada altura de referencia

Z_{ref} : Altura de referencia

α : Exponente de rugosidad (*wind shear exponent*). Varía entre 0,0 a 0,40, según el tipo de rugosidad del terreno. Para el agua 0,13; grama, 0,14 a 0,16; cultivos y arbustos, 0,20; bosques, 0,25 zonas urbanas 0,40

Para la aplicación de esta formula, se requiere conocer al menos una observación de la velocidad y dirección del viento sobre un punto durante un periodo de un año y buen conocimiento de la geografía física de la zona donde está emplazado el anemometro o bien el sensor (Guevara Díaz, 2013).

2.1.3. Descripción estadística del viento: Distribución Weibull

La función de Weibull se utiliza como modelo empírico para poder aproximar los datos de velocidad del viento medidos para un sitio determinado. Estos parámetros son; parámetro forma que se tratan de la forma de la curva representada por una letra k , la cual es adimensional y un parámetro de escala representado por una letra a en m/s, estos se estiman utilizando diferentes métodos numéricos (Shoaib et al., 2019) .

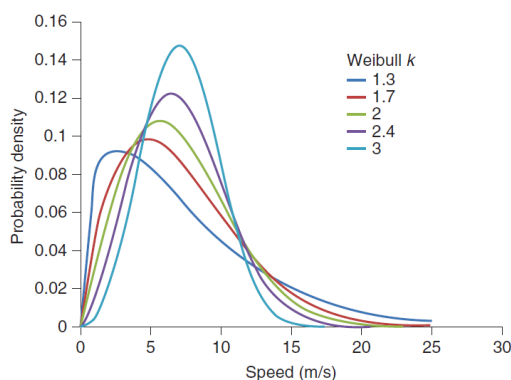


Figura 6 Curva de densidad de probabilidad de Weibull para un rango de valores de K

La figura muestra las curvas de densidad de probabilidad de Weibull para varios valores de k y una a igual a 8 m/s constante. Los valores de k varían de 1 a 3.5, los valores más altos indican

una distribución de frecuencia más estrecha (se refiere a un viento más constante y menos variable). Un rango de k observado comúnmente es de 1.6 a 2.4. Dentro de este rango la velocidad media es aproximadamente 0.89 veces el factor de escala. A menudo es útil referirse a los parámetros de Weibull, particularmente k , cuando se caracteriza el recurso eólico de un sitio. Sin embargo, es importante tener en cuenta que la curva de Weibull es una aproximación de la verdadera distribución de frecuencia de la velocidad del viento (Brower, 2012).

2.1.4. Curva de potencia

La curva de potencia de una turbina eólica es un gráfico que indica la potencia eléctrica que estará disponible a diferentes velocidades de viento. A continuación se muestra la forma de una curva de potencia teórica de un aerogenerador.

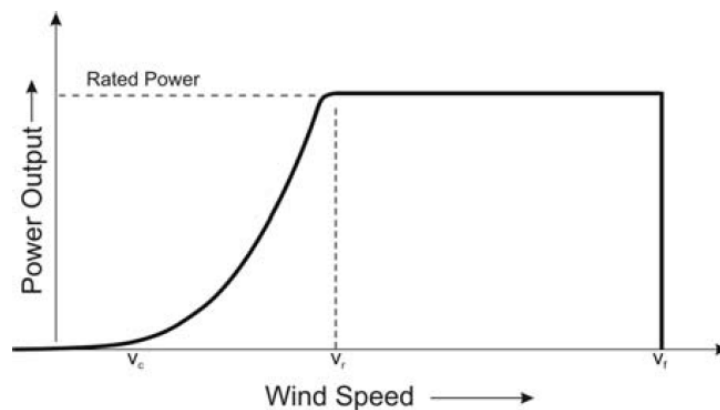


Figura 7 Curva de potencia teórica de un aerogenerador (Wagner & Mathur, 2009)

La figura muestra la forma de una curva de potencia teórica de un aerogenerador. Las características principales de una curva de potencia es que posee tres partes, la primera cuenta con la velocidad de encendido o en inglés *cut in wind speed* (v_c), usualmente los aerogeneradores están diseñados para comenzar a funcionar a velocidades del viento alrededor de 3 a 5 m/s. Por debajo de esta velocidad del viento, la energía en el viento no es suficiente para superar la inercia del rotor, por tanto la maquina no produce ninguna potencia por debajo de esta velocidad de viento.

La turbina eólica se programará para detenerse a altas velocidades del viento, por encima de en algunos casos 25 m/s, para evitar dañar la turbina o sus alrededores. La velocidad del viento de parada se llama *cut out wind speed* en la figura se muestra como v_f . Otra parte de la curva es la velocidad nominal de viento (v_r), es la velocidad de viento a la que se alcanza la potencia nominal. Este valor para turbinas de tamaño de megavatios es de aproximadamente 12 m/s a 15 m/s y corresponde al punto en el que la eficiencia de conversión está cerca de su máximo. La potencia de salida por encima de la velocidad del viento nominal se mantiene mecánicamente o eléctricamente a un nivel constante (Wagner & Mathur, 2009).

C_t es el coeficiente de confianza de la turbina, es un parámetro que representa la cantidad de fuerza generada por el rotor contra el viento. Como la curva de potencia, el C_t es especificado por el fabricante y varía en función de la velocidad.

2.1.5. Rosa de Viento

El viento cuenta dos parámetros esenciales para su estudio, estos son la velocidad y dirección. La rosa de viento describe estos la dirección del viento y su valoración a lo largo del tiempo. La velocidad media del viento es entre 3 m/s y 7 m/s, esta es mayor en las costas, en otras regiones va desde 3 m/s a 4 m/s y aumenta en las montañas dependiendo de la altitud y la topografía. Durante la noche la velocidad media es más débil y varía muy poco, y aumenta a la salida del Sol, alcanzando máximos entre las 12 y 16 horas (Fernandez, 1993).

Una rosa de viento ofrece una visión concisa pero cargada de información sobre cómo se distribuyen la velocidad y la dirección del viento en un lugar determinado. Se presenta en un formato circular, la rosa de viento muestra la frecuencia de los vientos que soplan en direcciones particulares. La longitud de cada radio alrededor del círculo se reitera a la frecuencia del tiempo en que el viento sopla en una dirección particular, cada frecuencia concéntrica creciente en los círculos extremos.

2.1.6. Predicción de velocidad de viento

Se debe predecir la velocidad del viento para estimar la capacidad de generación de energía eólica. Existen tres tipos de predicción que son a corto, mediano y largo plazo. El de corto plazo es como de 10 segundos o 10 minutos, los de mediano plazo pueden ser datos de predicción horaria y la predicción de la velocidad del viento a largo plazo implica días. La predicción del viento a corto plazo es importante para el control de los aerogeneradores. La predicción de mediano plazo apoya la planificación de compromiso de la unidad. La predicción de la velocidad del viento a largo plazo se utiliza para determinar la combinación de generación y el mantenimiento programado en sistemas de energía (Kusiak, Zhang, & Verma, 2013).

Métodos de predicción basados en la física es el modelo Numerical Weather Prediction (NWP) se utilizan para predecir la velocidad del viento, la temperatura, la presión y la humedad. El modelo NWP comúnmente discutido para la predicción de la velocidad del viento fue el modelo a meso escala (Kusiak et al., 2013).

2.2. Programas

Los modelos numéricos son capaces de estimar la producción de energía considerando varios factores físicos. El estado de la atmósfera se puede describir mediante las siguientes siete variables: presión, temperatura, densidad, humedad, dos componentes de velocidad horizontal; todas las funciones de tiempo y posición. Estas siete variables pueden describirse mejor mediante siete ecuaciones: la ecuación de estado, la primera ley de la termodinámica, tres componentes de la segunda Ley de Newton y las ecuaciones de continuidad para la masa y las sustancias. El modelo óptimo debe construirse utilizando la escala espacial y temporal más pequeña sin embargo esto requiere una potencia de computadora significativa que puede ser costosa y requerir mucho tiempo. A medida que aumenta la potencia de la computadora, estas escalas pueden hacerse cada vez más pequeñas, provocando que los análisis sean más precisos (Sveinbjornsson, 2013).

El Programa WAsP es un modelo lineal basado en la teoría de Jackson-Hund, este es un modelo lineal de flujo de viento. El modelo resuelve las ecuaciones de Navier-Stokes linealizadas bajo varios supuestos: flujo de estado estable, advección lineal y cierre de turbulencia de primer orden. Además el terreno solo tiene en cuenta como una perturbación de primer orden.

El programa de Openwind que está basado en modelo consistente de masa. Este modelo no contiene ecuaciones dinámicas. Resuelve la conservación de la ecuación de masa para generar un flujo de viento en 3D, libre de divergencias, dependiendo del terreno. El modelo WindMap se inicializa utilizando datos de viento en la superficie y en la parte superior del aire cuando se ejecuta junto con un modelo PNT o utilizando datos de mástil de metraje cuando se ejecuta en Openwind (Beaucage & Brower, 2012).

2.2.1. Programa WAsP

Wind Atlas Analysis and Application Program (WAsP) desarrollado por Technical University of Denmark (DTU). Tiene herramientas de análisis de datos de viento, estimación climática de viento, cálculo de producción de parque eólico y ubicación de las turbinas eólicas. Es un software de extrapolación vertical y horizontal estadística climática del viento (Mortensen, Heathfield, Rathmann, & Nielsen, 2011). La metodología de WAsP consiste en cinco etapas que como muestran en (Mortensen, Heathfield, Rathman, & Nielsen, 2014) son:

- Análisis de datos brutos de viento, esta opción permite un análisis de cualquier serie temporal de mediciones de viento para proporcionar un resumen estadístico del clima del viento, específico del sitio. Esta parte se implementa en herramienta de software separadas, el WasP Climate Analyst y el antiguo programa Observed Wind Climate (OWC) Wizard.
- Generación de datos eólicos, los datos de viento analizados se pueden convertir en un conjunto general de datos de clima de viento o atlas de viento. En un conjunto de datos de atlas de viento, las observaciones de viento se han limpiado con respecto a las condiciones específicas del sitio. Los conjuntos de datos del atlas de viento son independientes del sitio y las distribuciones de viento han sido referenciadas a ciertas condiciones estándar.
- La estimación de clima eólico, mediante un conjunto de datos de atlas de viento calculados por WAsP o uno obtenido de otra fuente. El programa puede estimar el clima del viento en cualquier punto y altura específicos realizando el cálculo inverso que se utiliza para generar un atlas de viento. Al introducir descripciones del terreno alrededor del sitio predicho, los modelos pueden predecir el clima real y esperado del viento en ese sitio.
- Estimación del potencial eólico, el contenido total de energía del viento medio se calcula por WAsP. Además se puede obtener una estimación de la producción de energía media anual real de una turbina eólica proporcionando a WAsP la curva de potencia de la turbina eólica en cuestión.
- Cálculo de la producción del parque eólico. Dadas las curvas de potencia y coeficiente de empuje de la turbina eólica y la disposición del parque eólico, WAsP finalmente puede estimar las pérdidas de estela para cada turbina en un parque y, por lo tanto, la producción neta anual de energía de cada turbina eólica y de todo el parque es decir la producción bruta menos las pérdidas por estelas.

El programa contiene partes de análisis y aplicación, que pueden resumirse de la siguiente manera:

La parte de análisis

- Serie de velocidad y dirección del viento -> Observad wind climate (OWC)
- Observed wind climate + met. station site description-> Generalised wind climate (GWC, wind atlas data sets)

Para la aplicación

- GWC + descripción de turbina -> Predicted Wind Climate (PWC)
- PWC+ curva de potencia -> Annual Energy Production (AEP) de la turbina

Y la parte de producción parque eólico

- PWC+WTG características-> Gross AEP de parque eólico
- PWC+WTG Características+ wind farm layout -> Wind Farm wake Losses
- Gross AEP+ wake losses -> net AEP de parque eólico

WAsP está basado en dos asunciones principales, la primera es clima eólico generalizado se asuma que está cerca de la estación meteorológica y las turbinas, segundo se asume que los datos históricos de viento es representativo del futuro, los 20 años de tiempo de vida de las turbinas (Mortensen, 2018). Se puede obtener predicciones precisas utilizando el programa de WAsP siempre que los sitios de referencia y predichos sean (Bowen & Mortensen, 1996):

- Sujeto al mismo régimen climático
- Las condiciones meteorológicas prevalecientes están cerca de ser neutrales estables
- El terreno circundante es lo suficientemente suave y liso como para garantizar flujos en su mayoría unidos
- Los datos de referencia son fiables

Los datos de viento generalizados del archivo Atlas se crean forzando los datos medidos para que se ajusten a una distribución de frecuencia estándar de Weibull. La magnitud de cualquier error de predicción se ve afectada por el grado de transformación aplicado por el procedimiento de análisis para crear el archivo Atlas. La dirección de la rosa se divide a menudo en 12 sectores de igual dirección. Las crestas empinadas y oblicuas afectan la dirección del flujo incidente y pueden causar que la dirección del viento en el sitio predicho caiga en un sector de dirección adyacente al que ocurre en el sitio de referencia (Bowen & Mortensen, 1996).

Esta rugosidades pueden ser asignadas en la herramienta de Map Editor, donde teniendo cuidado se dibuja la rugosidad en función a un mapa de uso de suelo o una imagen que pueda ser dibujada.

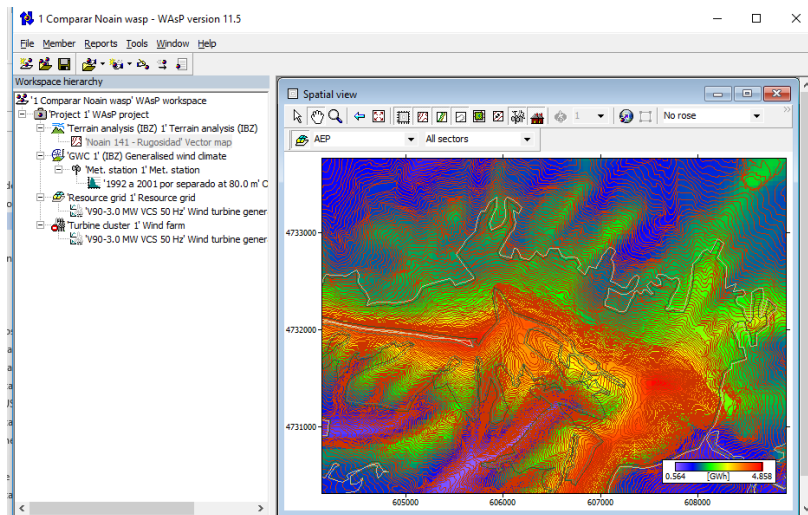


Figura 8 Interfaz de WASP

WASP cuenta con una barra de herramientas, un área de vista de árbol donde se va insertando los documentos y finalmente una parte donde se puede visualizar la información insertada y también los resultados generados por el programa.

Con respecto al índice de RIX está definido como la fracción porcentual del terreno a una cierta distancia de un sitio específico que es más inclinado que alguna pendiente crítica, digamos 0.3. Este índice se propuso como una medida aproximada de la extensión de la separación del flujo, por lo tanto, la medida en que el terreno viola los requisitos de los modelos de flujo ilegalizados. El índice de RIX también se ha utilizado para desarrollar un indicador de rendimiento orográfico para las predicciones de WASP en terrenos complejos donde el indicador se define como la diferencia en el porcentaje de fracciones entre el sitio previsto y el sitio de referencia. El indicador puede proporcionar el signo y la magnitud aproximada del error de predicción para situaciones en las que uno o ambos sitios están situados en un terreno bien fuera del área de trabajo recomendada (Mortensen et al., 2014).

En la práctica el índice de RIX se calcula para cada uno de los radios que se originan en el sitio (estación meteorológica o turbina eólica). Un sitio plano tendrá entonces un RIX de 0% las pendientes del terreno son menos inclinadas que 0.3 y es probable que el flujo este unido, es decir siga la superficie del terreno, esta situación es generalmente dentro de la envolvente del rendimiento de WASP. Si el RIX es mayor a cero las partes del terreno son más empinadas que 0.3 y la separación del flujo pueden ocurrir por sectores (Mortensen et al., 2014).

2.2.2. Herramientas de WASP

Las herramientas que contiene WASP que se utilizaron en este estudio son WASP Map Editor, WASP Climate Analyst, WASP Turbine Editor and Air density Calculator. Estas herramientas pueden ser descargadas de la página de DTU, y pueden ser utilizadas sin ningún tipo de licencia.

El WASP Climate Analyst, en términos generales es un programa que realiza el análisis en series de tiempo de datos meteorológicos (Mortensen et al., 2014). Es una herramienta de utilidad gratuita, que está diseñada para la importación, selección y análisis de series de datos de viento, incluida la generación de climas de viento promedio observados para la evaluación de recursos eólicos y climas de viento observados para la evaluación de sitios.

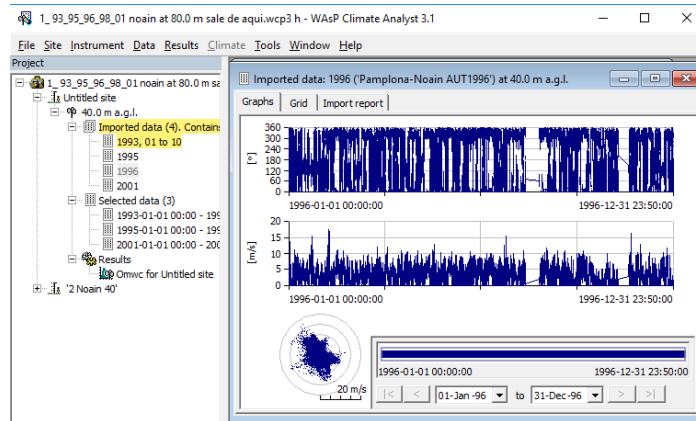


Figura 9 Interface WASP Climate Analysis

Map Editor de WASP es una herramienta que puede recuperar, editar, verificar, reformatear, transformar y almacenar archivos de mapas. También puede transformar otros formatos vectoriales de elevación y datos de cobertura terrestre, incluidos los formatos GIS comunes y los archivos exportados desde Google Earth. Es posible digitalizar mapas escaneados en la pantalla mediante el uso del mouse. Recientemente se agregaron funcionalidades como que las instalaciones de importación de datos de elevación y consta de SRTM a través de internet y comprobación rápida y eficiente de errores.

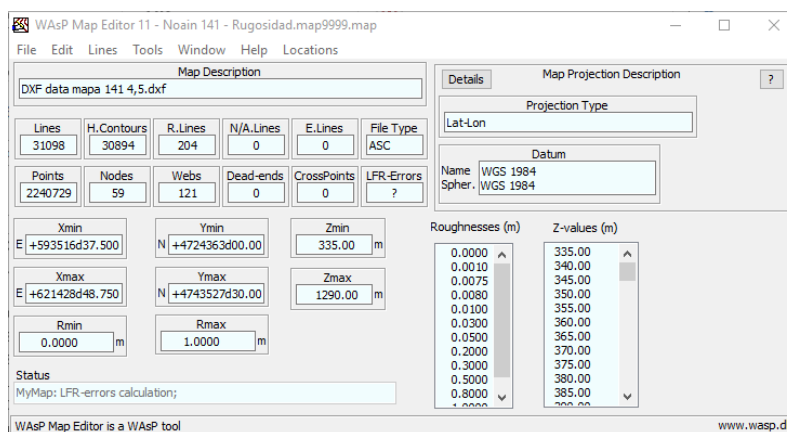


Figura 10 Interface de WASP Map Editor

La herramienta de WASP Turbine Editor facilita el establecimiento de archivos de curvas de potencia y empuje que necesita WASP para calcular la producción de energía de una turbina eólica, así como la pérdida de estela si la turbina está situada en un parque eólico.

La herramienta de WASP Air Density Calculator, calcula la densidad del aire que se encuentra en kg/m^3 en función de la altitud o elevación que se encuentra en metros y la temperatura del aire a la misma altitud. Se supone un lapso de 6.5 k/km y un a presión a nivel del mar de 1013.25 hPa. Las densidades del aire a intervalos regulares de altitud y temperatura también se dan aquí en forma tubular. La estimación se basa en una llamada atmósfera estándar.

2.2.3. Programa Openwind

Openwind es un programa desarrollado por AWS Truepower que ahora pertenece a UL, tiene como objetivo el diseño, optimización y evaluación de proyectos de energía eólica. El programa sigue un modelo de sistema de información geográfica (GIS) (AWS Truepower, 2017).

En el ambiente de trabajo de Openwind tiene la capacidad de organizar los archivos de ingreso en forma de árbol. Los documentos que se pueden agregar son los siguientes: Carpeta, diseño de turbina, sensores medio ambientales, mapas de viento, puntos, líneas y polígonos. Esta vista de árbol admite arrastrar y soltar, así como selección múltiple. De este modo se puede ir reorganizando la jerarquía de capas, de la misma manera se puede seleccionar varias capas principales y se las puede mover.

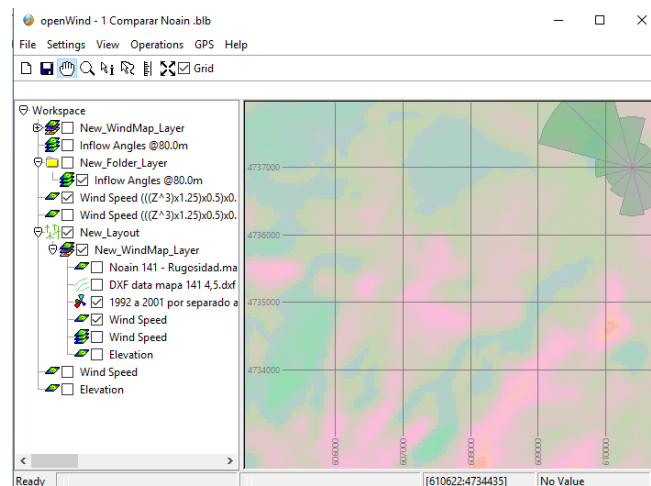


Figura 11 Interfaz de Openwind

La figura 11 muestra el espacio de trabajo que cuenta el programa de Openwind, se observa un menú principal donde especifica las diferentes operaciones que se pueden realizar en el espacio de trabajo. También cuenta con un área donde se modifica la vista de árbol en función a la necesidad del usuario.

Los beneficios de Openwind son que determina el mejor diseño para equilibrar la producción de energía con los costos de construcción utilizando el módulo de optimización de costo de Energía exclusivo de AWST. Los módulos de activación de Deep Array son más precisos que los módulos líderes de la competencia y son esenciales para estimar las pérdidas de estela para los parques eólicos a escala de utilidad. El software desarrollado con más de 30 años de experiencia en consultoría garantiza la confianza de las instituciones financieras. La compatibilidad con otro software eólico permite compartir archivos sin problemas y migrar fácilmente los procedimientos existentes.

Optimiza los diseños y las posiciones de las turbinas para minimizar el costo de la energía, teniendo en cuenta la producción de energía, los costos de operación, mantenimiento y los costos de capital, incluidos los costos de desarrollo de las turbinas y plantas. Comprenda el impacto que tiene cada turbina en la línea inferior.

Este software tiene tres niveles de acceso. Es la de acceso libre, la básica y la de empresa, cada uno de ellos tiene niveles en las limitaciones. Para la versión básica y de empresa es necesario

pagar la licencia, pero existe una diferencia del acceso a estas herramientas que se muestran a continuación.

Tabla 1 Producto de Openwind básico Vs empresa

Descripción características	Openwind Básico	Openwind Empresa
Autenticación de reportes		X
Optimización coste energético		X
Multiplataforma (ejecuciones de Windows/ Linux/ Unix, 32 bit y 64 bit)	X	X
Modelo de estela		X
Reducción direccional, ángulo de entrada y turbulencia		X
Intensidad de turbulencia efectiva (IEC614001-1 Ed3 Anexo D)		X
Integración GPS	X	X
Diseños de turbinas Gridded		X
Modelo de ruido ISO 9613	X	X
Lógica de capa y validez de capa (con configuración de búfer)	X	X
Optimización de diseño	X	X
Modelo de flujo de viento de conservación masa (mapa de viento)	X	X
Pérdidas de rendimiento no ideal		X
Optimización respetando el ruido	X	X
Pervasive multi-threading	X	X
Parpadeo de la sombra	X	X
Localización y optimización de grandes sitios restringidos		X
Modelos de estela estándar (parque, parque modificado, Eddy Viscosity)	X	X
Captura de energía de series de tiempo		X
Programación de la turbina		X
Módulo de incertidumbre		X
Captura de energía validada	X	X
Modelo de zonas de impacto visual	X	X

La tabla 1 muestra el paquete completo que cuenta la herramienta de Openwind Empresa, y las limitaciones de Openwind en la versión de básico. En cuanto a la versión gratuita tiene mayores limitaciones, cuenta con las mismas que cuenta el básico pero no cuenta con la herramienta de parpadeo de sombra, trabaja con los datos de densidad estándar. A continuación se enumera los archivos que acepta Openwind.

- Imágenes (PGN, BMP, JPG, GIF, TIF)
- Capas vectoriales (mapas WAsP y archivos de formas que contienen puntos, poli líneas y polígonos)
- Reclasificar imágenes y datos en grilla usando una variedad de herramientas
- Acepta archivos de datos en gridded (ASC, ADF, TIF, GRD, RST, DTM, BIL, XYZ, etc.)

3. METODOLOGÍA

3.1. Adecuación de la información de entrada

Se utilizó la herramienta WAsP Wind Analyst para el tratamiento de datos de viento en ambos parques eólicos. Por un lado, en el caso del parque eólico Qollpana se utilizaron datos de viento horarios del año 2018. Estos datos fueron generados por el programa WRF que simula la dinámica meteorológica. Las simulaciones de datos de una resolución espacial de $1^{\circ} \times 1^{\circ}$, temporal de 6 horas como condiciones iniciales y a una altura de 85 m (Etayo, 2019).

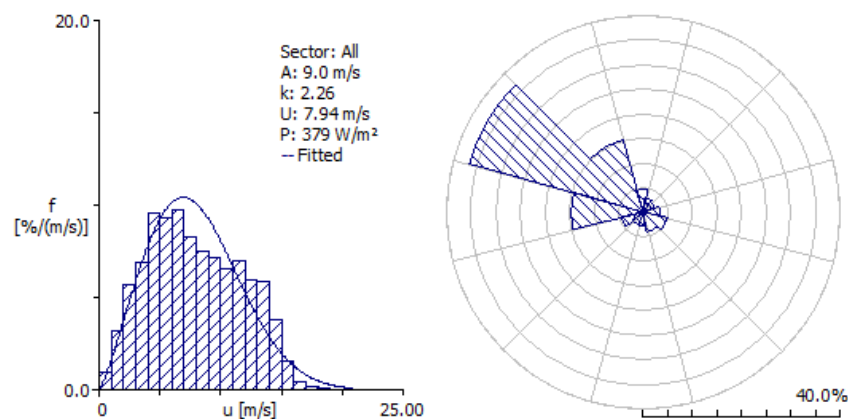


Figura 12 Curva Weibull y rosa de viento parque Qollpana

La figura 12 muestra curva de Weibull con un valor de A es 9.0 m/s, y k de 2.26. La rosa de viento muestra preponderancia en el sector 11 o a 300° . Por otro lado los datos del parque eólico El Perdón fueron obtenidos de la estación de medición el Perdón, las mediciones son cada diez minutos por un periodo de un año, desde marzo 2018 a marzo de 2019. Dichos datos fueron descargados de la página del gobierno de Navarra que son de acceso gratuito.

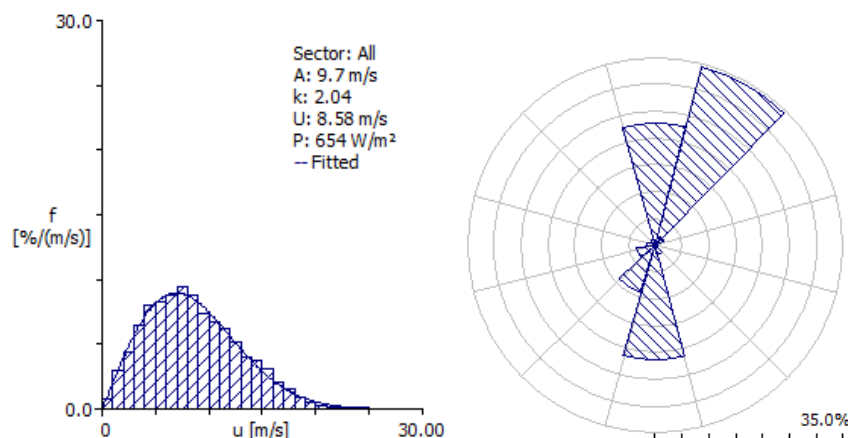


Figura 13 Rosa de viento y curva Weibull parque El Perdón

La curva de Weibull mostrada en la figura 13, cuenta con el parámetro de forma A con un valor de 9.7 m/s y k de 2.04. También se puede observar la rosa de viento que tiene dos tendencias, 35 % corresponde al sector 2 o 30° , y 22% al sector 7 o 180° .

Una vez tratados los datos de viento se recolectó la topografía. Para el parque eólico Qollpana la topografía fue descargada de Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) mediante el uso de la herramienta de Map Editor. El mapa topográfico descargado es de 900 km^2 . El caso del

parque eólico de El Perdón, se descargó la hoja 141 de topografía de Navarra con resolución de 1:50000. Una vez descargado el mapa topográfico, primero se editó en Autodesk, para luego agregarlo a Map Editor. Para ambos parques eólicos la herramienta Map Editor modifica el formato de los mapas, habilitando su uso en los programas de WAsP y Openwind.

Con respecto a la rugosidad, fue digitalizada con la herramienta Map Editor. En el parque eólico Qollpana se utilizó una imagen satelital de Google Earth para asignar valores de rugosidad en el área de estudio. En cambio para el parque eólico El Perdón se asignó valores de rugosidad a un mapa de uso de suelo, descargado de la página del gobierno de Navarra.

Tabla 2 Valores de rugosidad de terreno

Características de la superficie del terreno	Clase de rugosidad	z_0 específico de WAsP [m]	
1.5		4 (1.5 m)	1.5
> 1	Bosque alto		> 1
1.00	Ciudad		1.00
0.80	Bosque		0.80
0.50	Suburbio/afueras		0.50
0.40		3 (0.40 m)	0.40
0.30	Cortina arboles		0.30
0.20	Árboles o arbustos		0.20
0.10	Cultivo cerrado	2 (0.10 m)	0.10
0.05	Cultivo abierto		0.05
0.03	Pocos edificios y árboles	1 (0.03 m)	0.03
0.02	Área de aeropuerto con edificios y arboles		0.02
0.01	Aeropuerto en área alejada		0.01
0.008	Hierba cortada		0.008
0.005	suelo desnudo liso		0.005
0.001	Nieve		0.003
0.0003	Arena		0.003
0.0002	Usada para agua en el atlas	0 (0.0002 m)	0.0
0.0001	Agua, océano		0.0

La rugosidad se digitalizó en base a la tabla 2 (Mortensen et al., 2014). El rango de rugosidades va desde 0 a 1, que corresponde a la rugosidad mínima y máxima, respectivamente. En base a ese criterio se fue asignando valores de rugosidad a los parques eólicos Qollpana y El Perdón.

La descripción y características de las turbinas eólicas fueron obtenidas en base a los catálogos del fabricante. Las turbinas en el parque eólico Qollpana en la primera fase son Goldwind GW 77/1500 de 1.5 MW, y en la segunda fase son ENERCON E-82 E4 de 3 MW. Para el parque eólico El Perdón las turbinas son de Gamesa G-39 de potencia nominal de 500 kW. Debido a que estos aerogeneradores son antiguos no se encuentra la información del mismo, por tanto para este estudio se utilizaron los datos de la turbina ENERCON E-40 de 500 kW de potencia.

La información de estas turbinas para ingresar a la herramienta de WAsP fueron tratados con la herramienta de Turbine Editor, en cambio para el caso del programa Openwind se adecuó la información de las turbinas con la herramienta denominada Turbine Type Specifications, propia del programa de Openwind.

3.2. Entrada de información al programa de WAsP y Openwind

Se ingresaron los datos recolectados en los programas de WAsP y Openwind del viento, la topografía, la rugosidad, los aerogeneradores en los parques eólicos Qollpana y El Perdón.

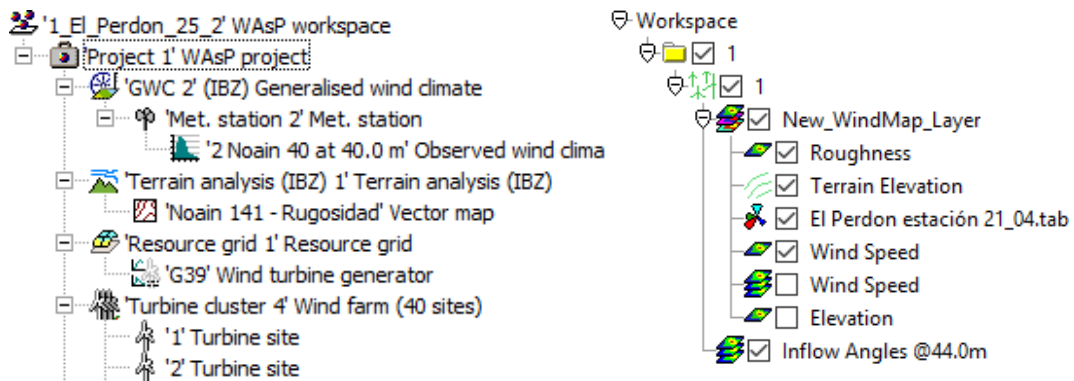


Figura 14 Ambiente de trabajo en WAsP y Openwind

Se creó un ambiente de trabajo como se muestra en la figura 14, en la parte izquierda muestra el ambiente de trabajo que tiene WAsP, y la derecha corresponde a Openwind. Los programas WAsP y Openwind cuentan con su propio ambiente de trabajo en el cual se fue añadiendo la información requerida, entre ellas modificar la densidad del aire para cada parque eólico. En el caso del parque eólico Qollpana tiene valores densidad promedio de 0.887 kg/m^3 , como valor mínimo de 0.861 kg/m^3 y valor máximo de 0.918 kg/m^3 (Mamani, Hackenberg, & Hendrick, 2018) para este estudio se tomó el valor promedio de densidad de aire. Para el caso del parque eólico El Perdón se realizó el cálculo de la densidad con una herramienta Air density calculator de WAsP, en función a la altitud y la temperatura.

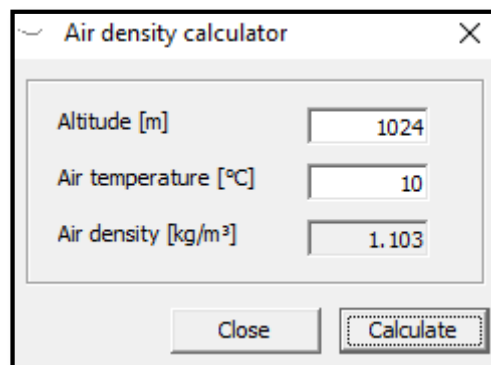


Figura 15 Herramienta para calcular la densidad de WAsP

La figura 15 muestra el cálculo realizado con esta herramienta, donde se ingresó el dato de la altitud y temperatura media del parque El Perdón, hallando de esta manera como densidad de aire de 1.103 kg/m^3 . Con estas nuevas densidades del área de estudio del parque eólico Qollpana y El Perdón se calculó la nueva velocidad del viento en el sitio de estudio mediante la siguiente ecuación.

$$v_{sitio} = v_{st} \left(\frac{\rho_{st}}{\rho_{sitio}} \right)^{1/3}$$

Ecuación 6

Donde v_{sitio} es la velocidad del viento en el área de estudio, ρ_{sitio} hace relación a la densidad del aire en el parque eólico, v_{st} es la velocidad que corresponde a la estándar y ρ_{st} representa la densidad estándar de 1.225 kg/m^3 . Para verificar el efecto que tiene la densidad de aire sobre las turbinas en ambos parques eólicos, se comparó la curva de potencia para las densidades de 1.225 kg/m^3 contra la curva de potencia de densidad de aire específica para cada parque.

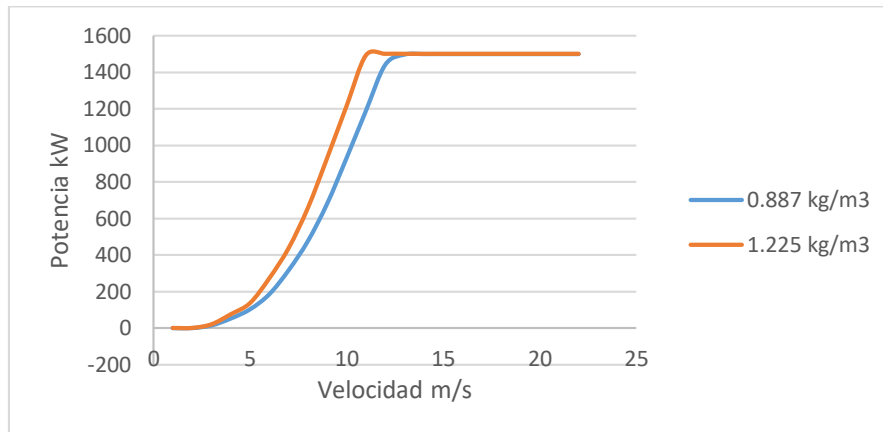


Figura 16 Curva de potencia de GW 77/1500 y curva modificada por efecto de la altura

La figura 16 muestra la curva de potencia a una densidad 1.225 kg/m^3 y la curva de potencia modificada que correspondiente a la densidad de 0.887 kg/m^3 , que corresponde a la primera fase del parque eólico Qollpana.

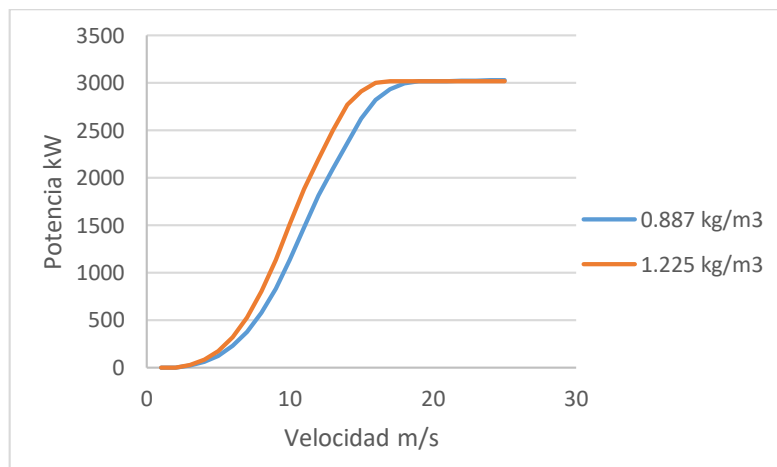


Figura 17 Curva de Potencia ENERCON E82E4 y curva modificada por efecto de la altura

La figura 17 muestra la curva de potencia de la segunda fase del parque eólico Qollpana, donde se observa el mismo resultado que para la fase 1 que se nota la diferencia entre a curva de potencia a una densidad de 1.225 kg/m^3 y la curva de potencia a una densidad de 0.887 kg/m^3 . Se realizó el mismo procedimiento para el parque eólico El Perdón, donde la densidad hallada es de 1.103 kg/m^3 .

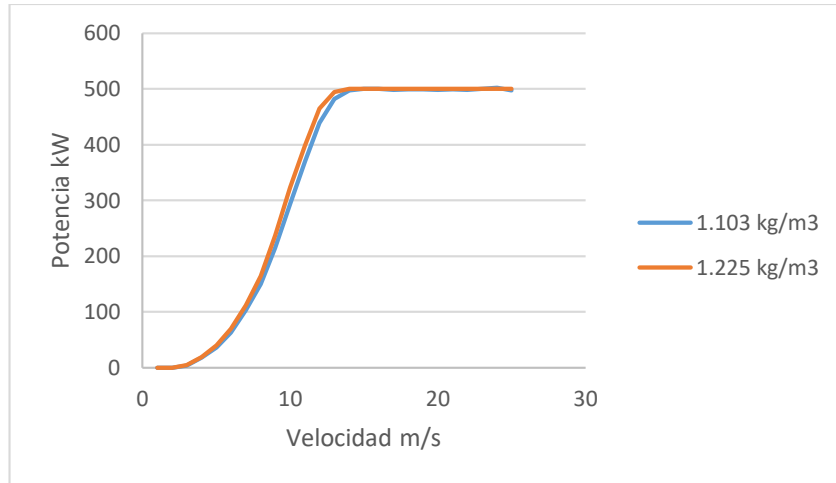


Figura 18 Curva de potencia ENERCON E-40 y curva modificada

Se puede observar en la figura 18 la curva de potencia en condiciones estándar y la curva de potencia modificada para el parque eólico El Perdón, no tienen una variación significativa entre la estándar de 1.225 kg/m³ y la densidad de 1.103 kg/m³.

3.3. Procesado de información para el análisis de los resultados generados

Los mapas generados por los programas de WASP y Openwind están compuestos por 100 filas y 100 columnas de 50 m por lado.

Tabla 3 Estructura de mapas generados

Nombre	Filas	Columnas	Área (km ²)
Qollpana	100	100	25
El Perdón	100	100	25

Los mapas tienen un área de 25 m², están compuestos por 10000 cuadrados donde cada uno de ellos que tienen un valor de velocidad y elevación del terreno. Como se pretendía realizar la comparación de los mapas, se realizó la descarga en formato Ascii grid (*.asc). La figura 19 muestra al lado izquierdo, la forma que se muestra en el programa y en el lado derecho después de realizar la descarga, como se observa cada cuadrado tiene un valor.

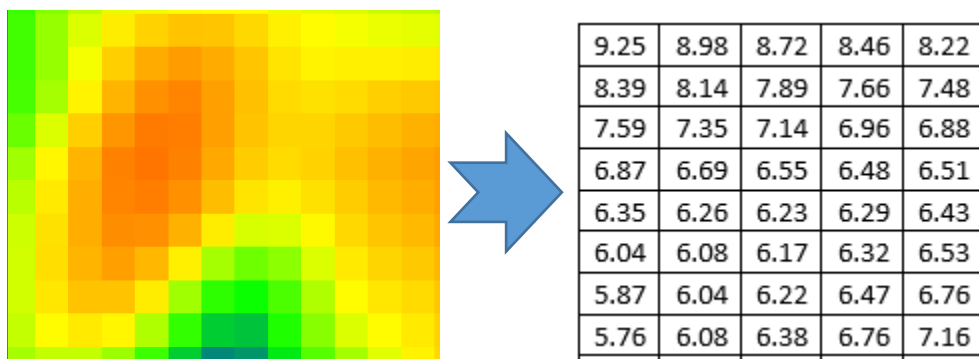


Figura 19 Valores del mapa de velocidad de WASP

Con el objeto de realizar la comparación entre los valores de los resultados de viento generados por los programas de WAsP y Openwind de cada cuadrícula, se halló con la ecuación de RMSD (desviación cuadrática media siglas en inglés) representada por la ecuación 7.

$$RMSD = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_{obs,i} - X_{model,i})^2}$$

Ecuación 7

Donde N es el número total de la multiplicación de filas por columnas, $X_{obs,i}$ los valores de WAsP y $X_{model,i}$ los valores de Openwind (Kovács & Péter, 2016). El resultado se interpretó de la siguiente manera: cuando el valor de RMSD es alto, significa que el margen de error en las variables ajustas también es alto, mientras que los valores que están cerca de cero indican un ajuste casi perfecto (do Nascimento Camelo, Lucio, Junior, & de Carvalho, 2018). Las formas no dimensionales del RMSD son útiles porque a menudo se requiere comparar mediante NRMSD (desviación cuadrática media cuadrática normalizada) que se representa de la ecuación 8:

$$NRMSD = \frac{RMSE}{\bar{X}_{obs}}$$

Ecuación 8

Donde \bar{X}_{obs} : representa al promedio de los valores de WAsP. Se realizó este procedimiento para los dos parques eólicos. La normalización de RMSD facilita la comparación entre conjuntos de datos o modelos diferentes con diferentes escalas.

4. RESULTADOS

4.1. Análisis comparativo de mapas

Los mapas generados para el parque eólico Qollpana se encuentran dentro de las siguientes coordenadas: en el eje Y el límite superior es 8050882 m, el inferior 8045932 m; en el eje X el límite superior tiene un valor de 260977 m y el límite inferior 256027 m, de la zona 20K. En cuanto al parque eólico El Perdón, se encuentra inmerso en las coordenadas: eje Y con valor superior de 4734682 m y valor inferior de 4729678 m; eje X con valor superior de 605957 m y valor inferior de 601007 m, de la zona 30T.

4.1.1. Mapa de velocidad

El mapa de velocidad de viento generado por WAsP para el parque eólico Qollpana se muestra en la figura 20, donde se encuentra identificadas las coordenadas del mapa del eje X y eje Y, también se puede verificar la ubicación actual del parque.

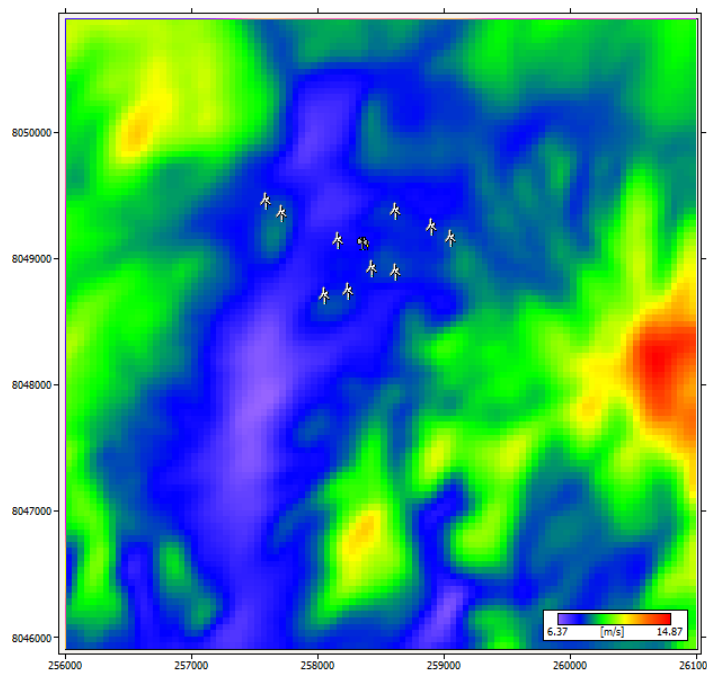


Figura 20 Mapa de Velocidad del parque eólico Qollpana generado por WAsP

Con el objeto de comprender mejor el mapa de velocidad es necesario entender la leyenda, esta se encuentra ubicada en la parte inferior derecha del mapa. La figura 21 muestra la leyenda generada por WAsP para el parque eólico Qollpana, se puede identificar el valor mínimo y máximo de velocidad del viento, también la unidad de medición del mapa.

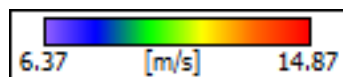


Figura 21 Leyenda de velocidad de viento del programa WAsP

El mapa de velocidad de viento generado por el programa de Openwind para el parque eólico Qollpana se puede observar en la figura 22, donde están las coordenadas del mapa del eje X y eje Y, también se puede observar la ubicación del parque eólico.

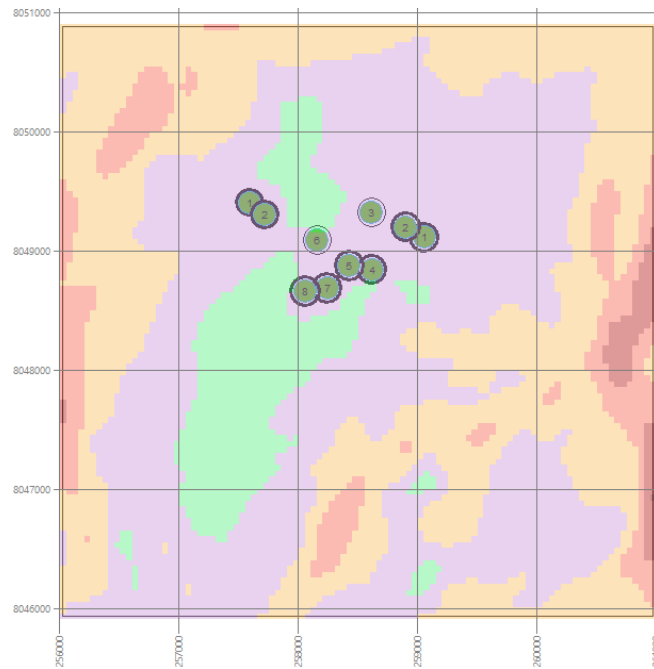


Figura 22 Mapa de Velocidad del parque eólico Qollpana generado por Openwind

La leyenda del mapa de velocidad del viento generada por Openwind, se encuentra dentro de las propiedades del mismo, en la figura 23 se puede observar dicha leyenda, que divide en rangos las velocidades de viento además de mostrar la unidad de medición en uso.

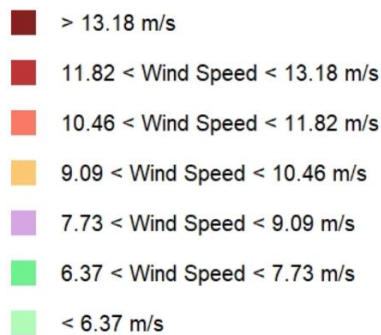


Figura 23 Leyenda de Openwind

Los mapas de velocidad de viento generados para el parque eólico El Perdón en la figura 24, izquierda WAsP y derecha Openwind, son semejantes visualmente, los resultados máximos y mínimos de las leyendas respectivas están en los mismos rangos.

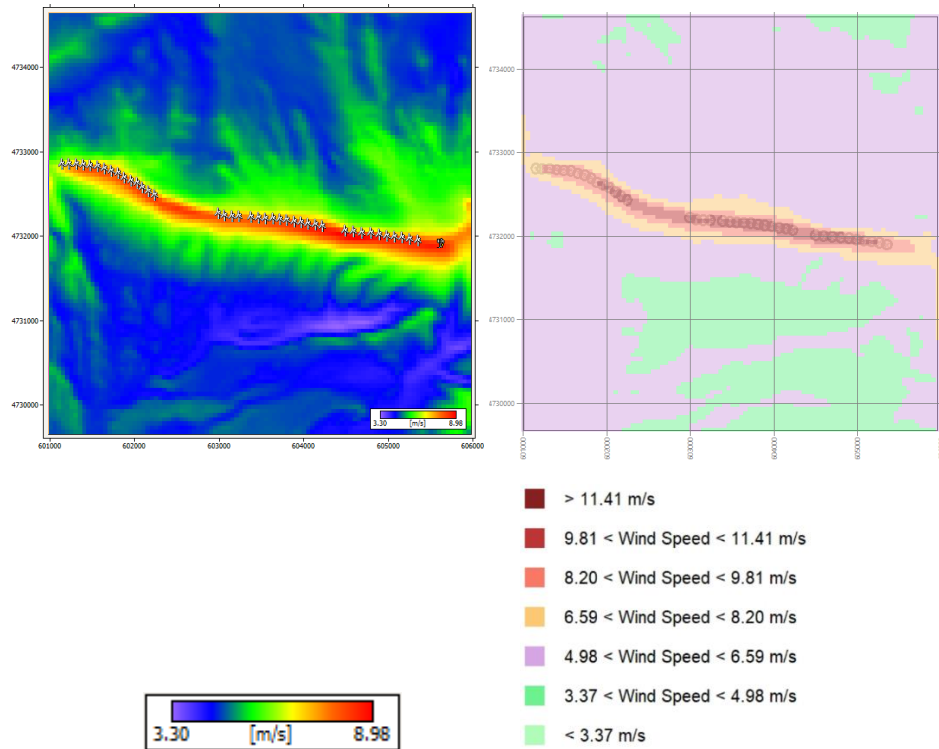


Figura 24 Velocidad de viento del parque eólico el Perdón en WAsP y Openwind

Al realizar la comparación de los mapas generados por ambos programas, se halló los valores de RMSD y NRMSD. La tabla 4 se encuentra los resultados de estos valores, también muestra los valores máximos y mínimos de la velocidad de viento para los dos parques eólicos.

Tabla 4 Comparativa de velocidades

	RMSD	NRMSD	WAsP		Openwind	
			Vmin (m/s)	Vmax (m/s)	V min (m/s)	V max (m/s)
Qollpana	0.53	0.06	6.37	14.89	6.36	13.18
El Perdón	0.64	0.13	3.30	8.98	3.37	11.41

En general los resultados de RMSD son muy cercanos a cero, como consecuencia se puede inferir que los mapas de viento generados por los programas WAsP y Openwind tienen velocidades de viento con un ajuste casi perfecto. En cuanto a los valores de NRMSD también son muy cercanos a cero, nótese que el perteneciente al parque eólico de Qollpana es menor al El Perdón. Con respecto a las velocidades de viento máximas y mínimas se comprueba que ambos parques tienen rangos semejantes.

4.1.2. Mapa de elevación

Los mapas de elevación de terreno generados para el parque eólico Qollpana mas las turbinas se muestran en la figura 25, izquierda WAsP y derecha Openwind.

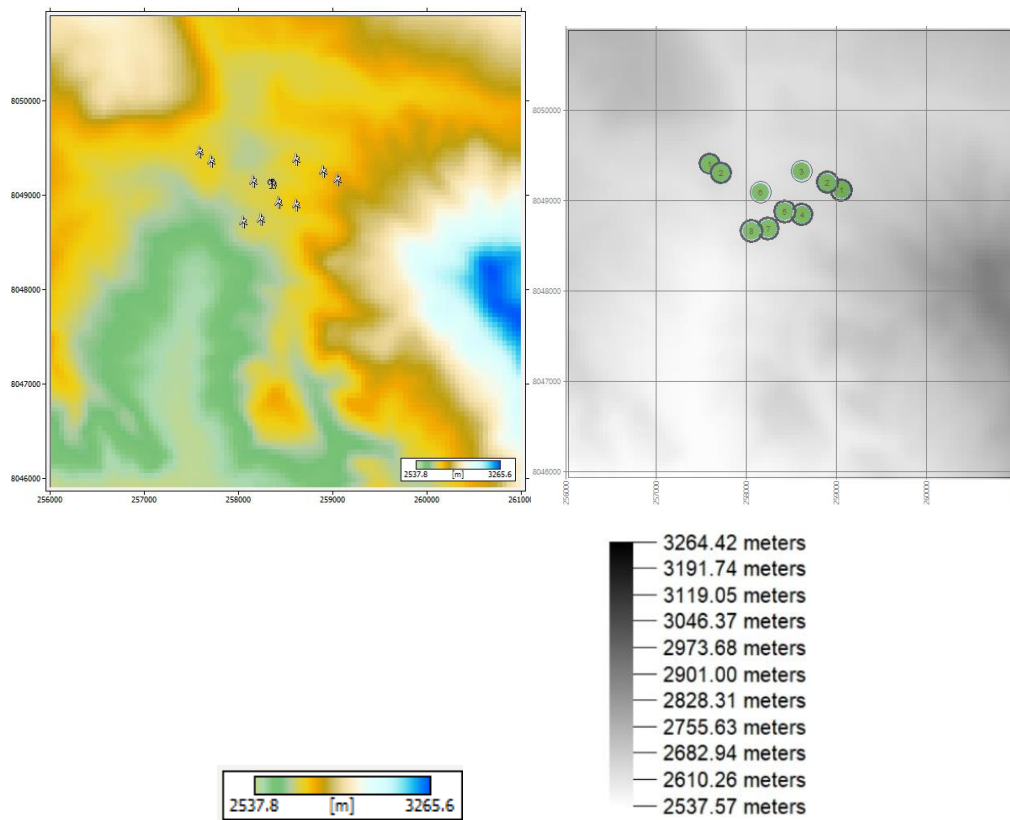


Figura 25 Elevación de terreno para parque eólico Qollpana en WAsP y Openwind

Los mapas de elevación de terreno correspondientes al parque eólico El Perdón y las turbinas existentes se muestran en la figura 26, izquierda WAsP y derecha Openwind.

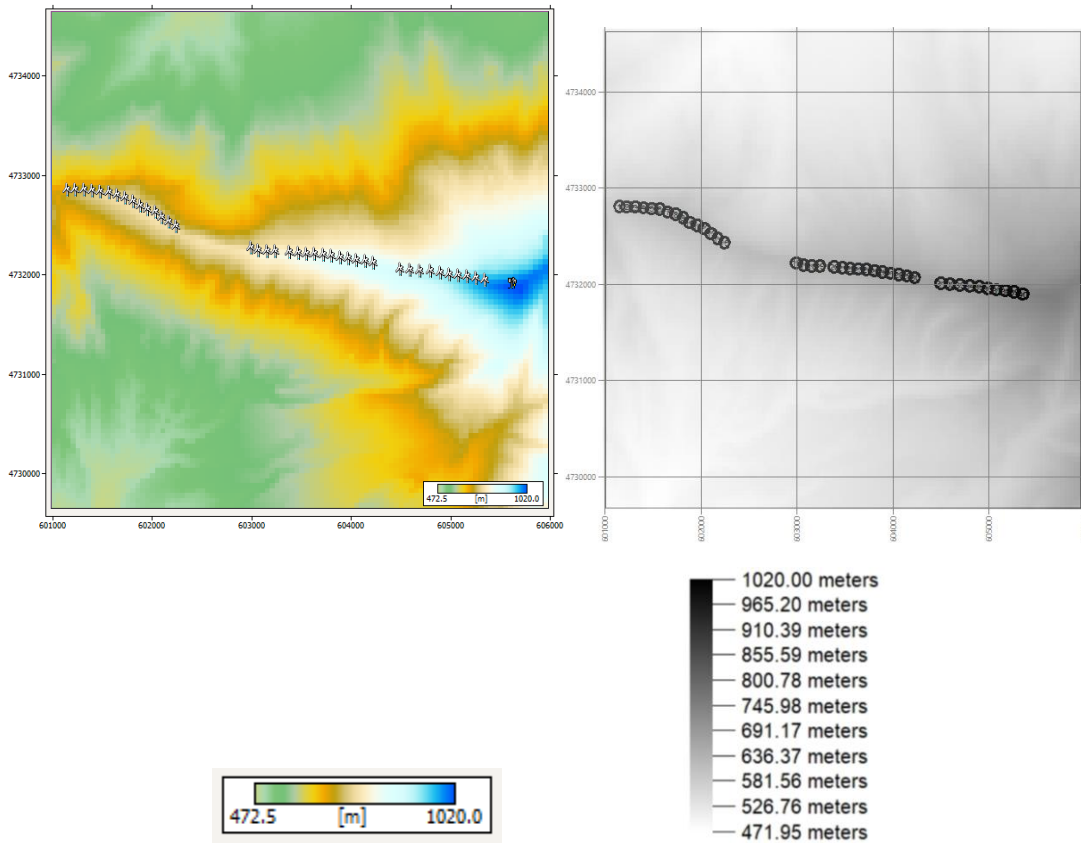


Figura 26 Elevación de terreno para parque eólico El Perdón en WAsP y Openwind

Los mapas de elevación de terreno tanto para el parque eólico Qollpana y El Perdón, muestran que los mapas generados por WAsP son visualmente interpretables a comparación del programa Openwind.

Tabla 5 Comparativa de elevación de terreno

			WAsP		Openwind	
	RMSD	NRMSD	Altura min(m)	Altura max(m)	Altura min(m)	Altura max(m)
Qollpana	0.50	0.00018	2537.8	3265.6	2537.57	3264.42
El Perdón	0.24	0.00038	472.5	1020	471.95	1020

Los valores calculados de RMSD y NRMSD correspondientes a estos mapas se muestran en la tabla 5. Del mismo modo que para la velocidad, se puede observar los valores de RMSD son cercanos a cero, por tanto los mapas de elevación generados por ambos programas tiene un ajuste casi perfecto. En cuanto a los valores de NRMSD también son muy cercanos a cero, se puede verificar que el perteneciente al parque eólico Qollpana es menor al de El Perdón, estos resultados eran esperados, debido a que se hizo uso en ambos programas del mismo mapa topográfico. Por otra parte los valores de elevación de terreno máximo y mínimo generados por los dos programas, se encuentran en el mismo rango.

4.2. Reportes en WAsP y Openwind

Los reportes son informes generados por los programas WAsP y Openwind para los casos de estudio Parque Eólico de Qollpana y El Perdón. Estos programas tienen la capacidad de generar reportes de energía generada u obtenida tras una simulación. WAsP incluye reportes adicionales sobre la densidad de potencia e índice de RIX, por otra parte Openwind provee un reporte de optimización de ubicación de turbinas.

4.2.1. Reporte de energía

WAsP a diferencia de Openwind genera un mapa “Anual Energy Production (AEP)” expresado en Giga Watts hora (GWh) como unidades de medición. La figura 27, muestra dicho mapa con la ubicación actual de las turbinas del parque eólico Qollpana (marcadas), estas se encuentran en sectores coloreados en verde los cuales corresponden a una potencia de 6.27 GWh aproximadamente.

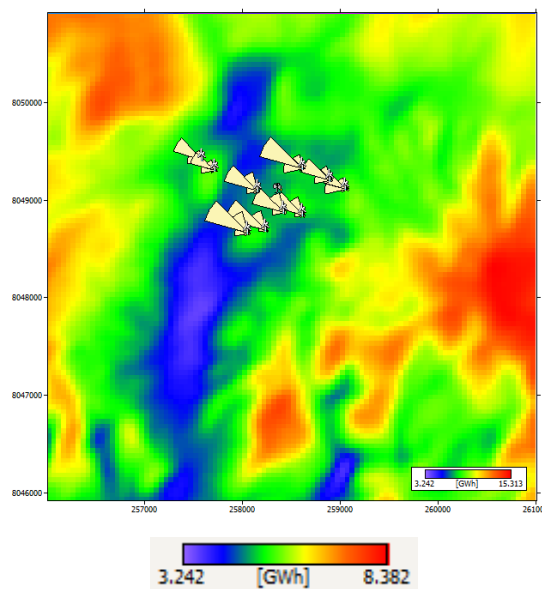


Figura 27 AEP para el área del parque eólico Qollpana

Tanto WAsP como Openwind generan reportes de energía bruta y neta, se entiende como energía bruta a la energía que puede captar los aerogeneradores sin pérdidas, en cambio a la energía neta se refiere a la energía generada incluyendo las pérdidas generadas por las estelas.

Tabla 6 Energía bruta y neta para el parque eólico Qollpana

	Fase	Energía bruta GWh	Energía neta GWh
WAsP	Qollpana fase 1	11.99	11.17
	Qollpana fase 2	62.81	55.01
Openwind	Qollpana fase 1	11.63	10.77
	Qollpana fase 2	75.19	65.89

La tabla 6 muestra que la fase 1 del parque eólico Qollpana tiene valores con una variación poco significativa. En cambio en la fase 2 existe una amplia variación de 62.81 GWh en WAsP a 75.19 GWh en Openwind. Realizando un cálculo manual del AEP en función a la curva de potencia de los aerogeneradores, para la fase 1 se obtiene un valor energía bruta de 10.81 GWh, para la fase 2 se halla el valor de energía bruta de 58.61 GWh.

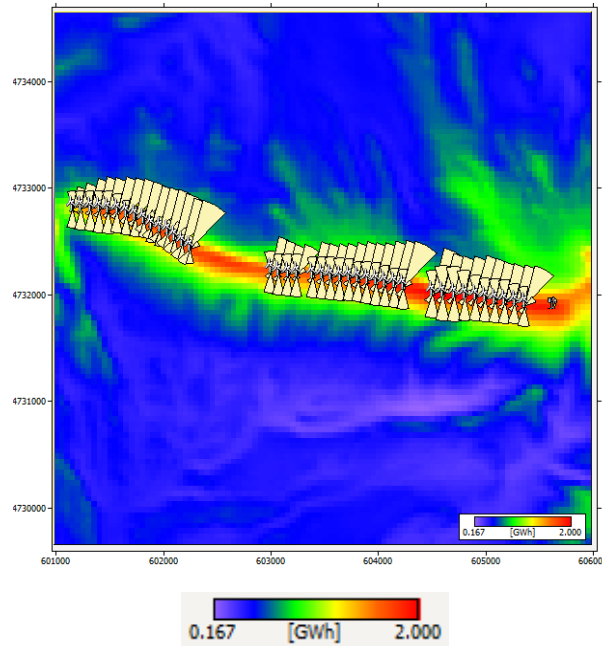


Figura 28 AEP para el área del parque eólico El Perdón

Para el parque eólico El Perdón de igual manera que Qollpana, se cuenta con un mapa generado por WAsP donde se muestra la ubicación actual de los aerogeneradores y se puede observar en la figura 28, estos se encuentran localizados en el área con mayor potencial eólico.

Tabla 7 Energía bruta y neta para el parque eólico El Perdón

	Energía bruta GWh	Energía neta GWh
WAsP	71.08	70.81
Openwind	83.9	82.04

La tabla 7 expone los reportes de energía bruta y neta generados por los programas WAsP y Openwind para el parque eólico el Perdón. Los resultados generados por Openwind son mayores a los generados por WAsP. También se puede observar que no existe mucha variación la energía bruta y neta, esto se debe a la ubicación de las turbinas, ya que se encuentran una al lado de otra y están orientadas de forma perpendicular al viento, por tanto los efectos de estela no afectan al cálculo de la energía neta.

Tras realizar un cálculo manual de la curva de potencia de los aerogeneradores, la energía bruta resultante tiene el valor de 75.12 GWh, este es mayor al generado por WAsP y menor con relación al generador por Openwind.

La versión gratuita de Openwind realiza los cálculos con densidad de aire de 1.225 kg/m^3 , por tal razón los resultados de Openwind son mayores a los de WAsP. Esto también puede ser observado en la densidad de potencia en la estación meteorológica para el parque eólico Qollpana, WAsP calcula una densidad de potencia de 379 W/m^2 , en cambio el programa de Openwind de 524.28 W/m^2 . Para el parque eólico El Perdón, WAsP calcula una densidad de potencia de 653 W/m^2 , y Openwind de 776.75 W/m^2 . En ambos casos WAsP calcula una menor densidad de potencia en comparación a los calculados por Openwind.

4.2.2. Reporte de densidad de potencia

WAsP genera mapas de densidad de potencia, diferenciado por colores donde el valor menor es violeta y el máximo es rojo.

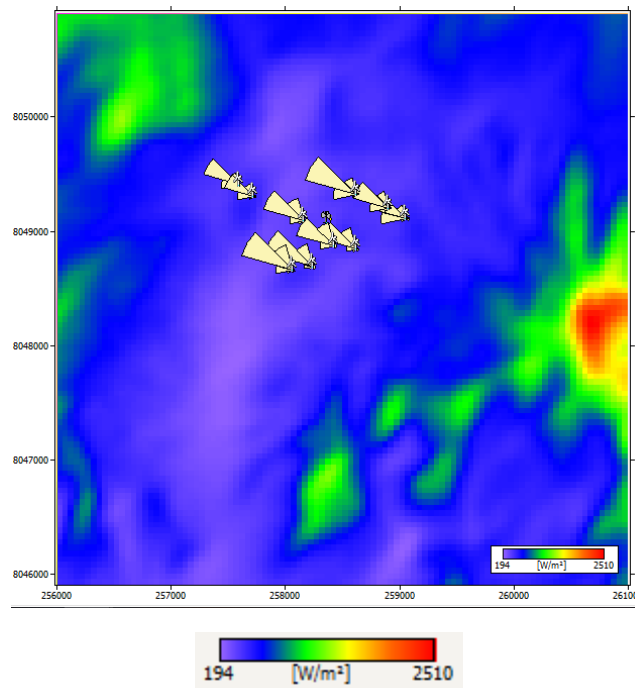


Figura 29 Densidad de Potencia para el área del parque eólico Qollpana

Para el parque eólico Qollpana, WAsP generó un mapa de densidad de potencia con un rango de 194 W/m^2 hasta 2510 W/m^2 como se observa en la figura 29, los aerogeneradores se encuentran en la zona de densidad de potencia color azul, correspondiente a un aproximado de 430 W/m^2 .

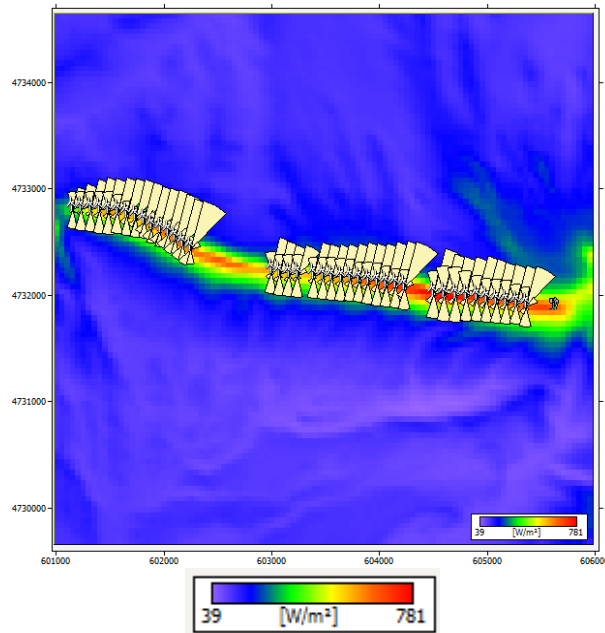


Figura 30 Densidad de Potencia para el área del parque eólico El Perdón

Los resultados generados para el parque eólico El Perdón, la densidad de potencia se encuentra entre los valores de 39 W/m^2 hasta 781 W/m^2 , como se observa en la figura 30. Los aerogeneradores están ubicados en la zona de color rojo correspondiente a la densidad de potencia con rangos desde 380 W/m^2 a 780 W/m^2 , ubicándolos en la zona con mayor densidad de potencia.

4.2.3. Reporte de Índice RIX

El mapa del Índice RIX para el parque eólico Qollpana muestra que en el área de estudio existe una variación que va desde 3.8 % a 21.6% como se puede observar en la figura 31.

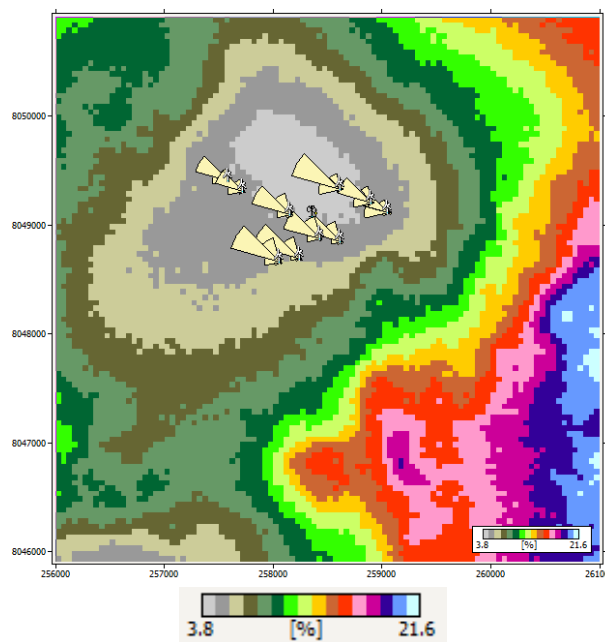


Figura 31 Índice de RIX para el parque eólico Qollpana

Para el parque eólico de Qollpana, la variación del Índice de RIX para los aerogeneradores es de 4.4% a 6.4% como se ve en la tabla 8, dividida en fases 1 y 2.

Tabla 8 Ubicación de aerogeneradores y valores del Índice de RIX

Fase 1 parque eólico Qollpana		
Sitio	Coordenadas[m]	RIX [%]
1	(257594.2,8049406.0)	5.1
2	(257723.4,8049305.0)	5.3
Fase 2 parque eólico Qollpana		
Sitio	Coordenadas[m]	RIX [%]
1	(259059.7,8049112.0)	5.4
2	(258906.7,8049201.0)	5.2
3	(258619.2,8049323.0)	4.4
4	(258623.3,8048843.0)	5.4
5	(258433.0,8048873.0)	5.3
6	(258163.9,8049091.0)	4.7
7	(258246.1,8048688.0)	5.9
8	(258063.4,8048660.0)	6.4

Los resultados del parque eólico El Perdón se observa en la figura 32, que la variación en el mapa del Índice de RIX es de 3.4% a 18.3%

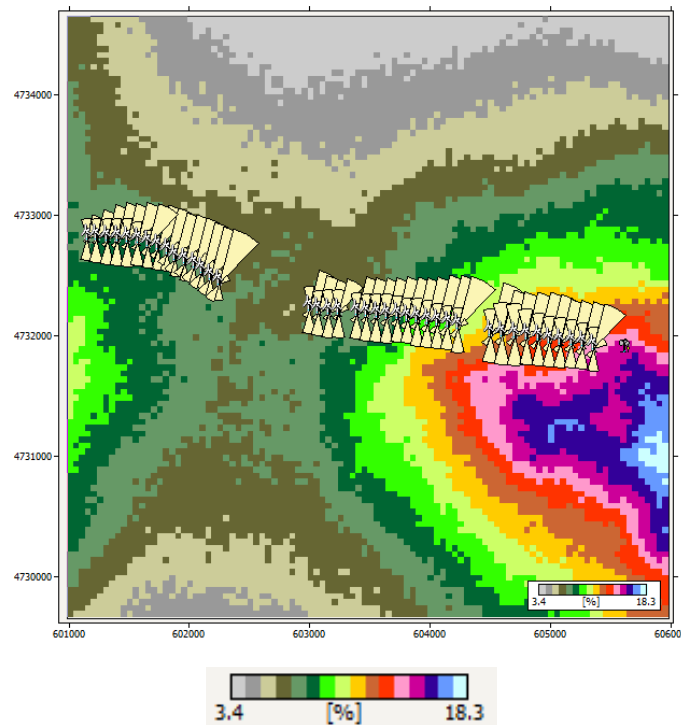


Figura 32 Índice de RIX del parque eólico El Perdón

El valor exacto del Índice de RIX para cada uno de los 40 aerogeneradores del parque eólico El Perdón se muestra en la tabla 9, donde se aprecia una variación que va desde 6.5% a 14.6%.

Tabla 9 Ubicación de aerogeneradores con valores de Índice de RIX

Sitio	Coordenadas [m]	RIX [%]
1	(601153.4,4732805.0)	7.8
2	(601230.4,4732802.0)	8.3
3	(601321.4,4732798.0)	8.0
4	(601403.4,4732793.0)	8.0
5	(601488.4,4732783.0)	7.9
6	(601573.4,4732778.0)	8.2
7	(601656.4,4732747.0)	8.3
8	(601739.4,4732724.0)	8.1
9	(601816.4,4732689.0)	7.5
10	(601884.4,4732637.0)	7.7
11	(601964.4,4732606.0)	7.5
12	(602038.4,4732576.0)	7.2
13	(602107.4,4732524.0)	7.2
14	(602176.4,4732474.0)	6.9
15	(602247.4,4732429.0)	6.5
16	(602997.4,4732219.0)	6.8
17	(603073.4,4732194.0)	7.4
18	(603158.4,4732186.0)	7.6
19	(603241.4,4732185.0)	7.1
20	(603389.4,4732175.0)	7.4
21	(603474.4,4732166.0)	7.2
22	(603557.4,4732158.0)	7.6
23	(603642.4,4732152.0)	7.9
24	(603728.4,4732149.0)	8.1
25	(603811.4,4732136.0)	9.2
26	(603894.4,4732122.0)	9.5
27	(603978.4,4732109.0)	9.2
28	(604062.4,4732096.0)	9.3
29	(604148.4,4732084.0)	10.0
30	(604231.4,4732066.0)	10.5
31	(604501.4,4732007.0)	11.7
32	(604599.4,4731998.0)	11.4
33	(604700.4,4731988.0)	11.9
34	(604801.4,4731981.0)	12.3
35	(604900.4,4731970.0)	12.8
36	(604990.4,4731951.0)	12.6
37	(605083.4,4731938.0)	13.0
38	(605175.4,4731929.0)	13.2
39	(605266.4,4731916.0)	13.6
40	(605356.4,4731894.0)	14.6

4.2.4. Reporte de optimización

Tras la optimización de la posición de las turbinas del parque eólico Qollpana y la comparación con las turbinas actuales, se parecía que estas no se superponen ni están próximas como muestra la figura 33 (izquierda: turbinas en ubicación actual; derecha: turbinas en ubicación optimizada).

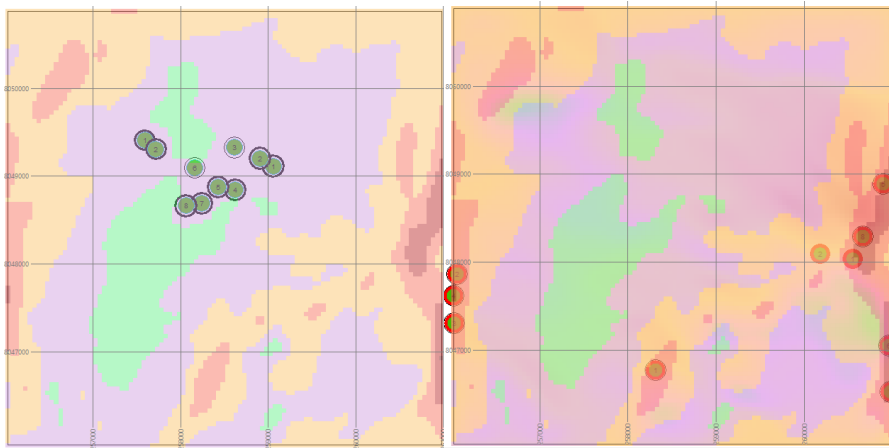


Figura 33 Comparación parque eólico Qollpana vs optimización de turbinas

A diferencia de Qollpana, tras realizar la optimización de ubicación de turbinas en el parque eólico El Perdón, estas se localizan en las mismas zonas donde actualmente están instaladas como se aprecia en la figura 34 (izquierda: turbinas en ubicación actual; derecha: turbinas en ubicación optimizada).

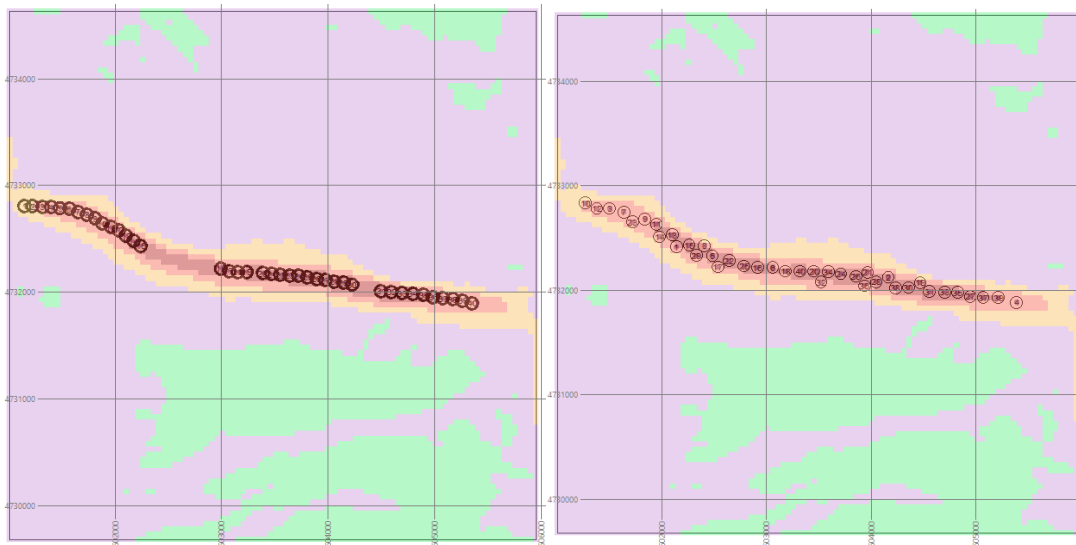


Figura 34 Comparación del parque El Perdón vs Optimización de turbinas

5. CONCLUSIONES

Los mapas de viento y elevación de terreno generados por WAsP y Openwind, para los parques eólicos Qollpana y El Perdón, de manera visual tienen una apariencia semejante. Los valores RMSD obtenidos son próximos a cero, demostrando la semejanza de estos mapas.

El programa WAsP genera reportes sencillos y deducibles, advierte con notificaciones sobre posibles problemas o incoherencia, incluye un manual de usuario en el cual detalla el manejo del programa y Openwind permite el uso de documentos en distintos formatos de forma directa sin uso de transformadores, cuenta con manual técnico en el cual se describen las características del programa pero no las funcionalidades, existen tutoriales explicando la operatividad del producto para versiones de pago.

Los programas WAsP y Openwind generan los reportes de energía bruta y energía neta. Los resultados muestran que las energías bruta y neta generadas por Openwind son mayores que las del programa WAsP, esto se debe a que la versión gratuita de Openwind trabaja con la densidad de aire estándar que es 1.225 kg/m^3 . Este mismo comportamiento se observa para las estaciones meteorológicas, donde la densidad de potencia en Openwind es mayor a la generada por WAsP.

Los reportes de Índice de RIX generados por WAsP establecen las inclinaciones del terreno. El parque eólico Qollpana tiene un índice pequeño, demostrando que la inclinación del terreno es baja. En cambio el parque eólico El Perdón el índice es mayor, por tanto la inclinación de terreno es alto.

Los reportes de densidad de potencia generados por WAsP y los de optimización generados por Openwind, demuestran que las turbinas en el parque eólico Qollpana están ubicadas en un área con potencial eólico medio, y que las turbinas del parque eólico El Perdón están ubicadas en el área con mayor potencial eólico.

6. BIBLIOGRAFÍA

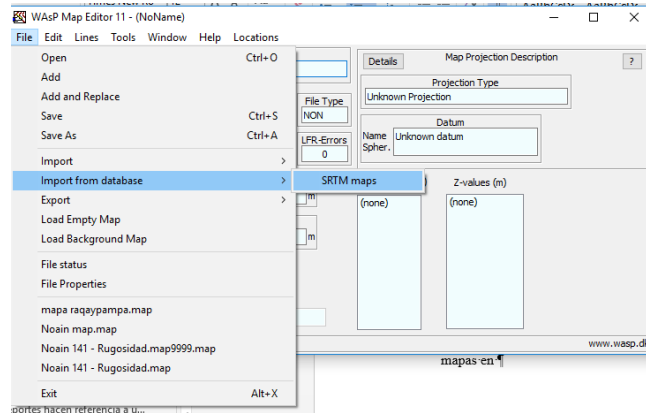
- Acciona. (2014). El primer parque eólico de Acciona, El Perdón, cumple 20 años. Retrieved from <https://www.acciona.com/es/salaprensa/a-fondo/2014/diciembre/primer-parque-eolico-acciona-perdon-cumple-20-anos/>
- AWS scientific, I. (1997). *No Title*. National Renewable Energy Laboratory 1617 Cole Boulevard Golden, CO 80401.
- AWS Truepower. (2017). OPENWIND USER MANUAL version 1.8. AWS Truepower, LLP, USA. Retrieved from <https://aws-dewi.ul.com/software/openwind/openwind-faq-technical/>
- Barroso, J. M. (2012). Comprender las políticas de la Unión Europea. Europa 2020 : la estrategia europea de crecimiento. Presidente de la Comisión Europea. <https://doi.org/10.2775/39991>
- Beaucage, P., & Brower, M. C. (2012). Wind Flow Model Performance. *AWSTruepower, LLC*, 10. Retrieved from <https://www.awstruepower.com/assets/Wind-Flow-Model-Performance-Do-More-Sophisticated-Models-Produce-More-Accurate-Wind-Resource-Estimates1.pdf>
- Bianco, V., Driha, O. M., & Sevilla-Jiménez, M. (2019). Effects of renewables deployment in the Spanish electricity generation sector. *Utilities Policy*, 56, 72–81. <https://doi.org/10.1016/J.JUP.2018.11.001>
- Bowen, A. J., & Mortensen, N. G. (1996). Exploring the limits of WASP: the Wind Atlas Analysis and Application Program. *European Union Wind Energy Conference*, (May), 584–587.
- Brower, M. C. (2012). *WIND RESOURCE ASSESSMENT A Practical Guide to Developing a Wind Project*. New York: A JOHN WILEY & SONS, INC. <https://doi.org/10.1002/9781118249864>
- Cuerva, A., & Sanz-Andrés, A. (2005). The extended Betz–Lanchester limit. *Renewable Energy*, 30(5), 783–794. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2004.07.017>
- do Nascimento Camelo, H., Lucio, P. S., Junior, J. B. V. L., & de Carvalho, P. C. M. (2018). A hybrid model based on time series models and neural network for forecasting wind speed in the Brazilian northeast region. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 28, 65–72. <https://doi.org/10.1016/J.SETA.2018.06.009>
- ENDECORANI. (2017). Parque eólico Qollpana. Retrieved from <http://www.endecorani.bo/index.php/pages/parque-eolico-qollpana>
- Espinasa, R., Sucre, C., Gutiérrez, M., & Anaya, F. (2017). *Dossier energético: Bolivia*. Retrieved from <http://www.iabd.org>
- Etayo, E. (2019). *Evaluación de recurso eólico en Bolivia y su impacto en el sistema eléctrico boliviano*. Universidad Mayor de San Simón; Universidad Pública de Navarra.
- Fernandez, P. (1993). Energía eólica. Universidad de Cantabria, Departamento de ingeniería eléctrica y energética. Retrieved from <http://www.termica.webhop.info/>
- Guevara Díaz, M. J. (2013). Cuantificación del perfil del viento hasta 100 m de altura desde la superficie y su incidencia en la climatología eólica. *Revista Terra Nueva Etapa*,

- XXXIX(46), 81–101. Retrieved from <http://www.redalyc.org/pdf/721/72130181006.pdf>
- Kovács, B., & Péter, P. (2016). Computing RMSD and fitting protein structures : how I do it and how others do it. Catholic University.
- Krohn, S. (2002). Guided Tour on Wind Energy.
- Kusiak, A., Zhang, Z., & Verma, A. (2013). Prediction, operations, and condition monitoring in wind energy. *Energy*, *60*, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.07.051>
- Lago, C. (1997). Estadísticas de Producción de Parques Eólicos en España. Año 1995. CIEMAT.
- Mamani, R., Hackenberg, N., & Hendrick, P. (2018). Efficiency of High Altitude On-shore Wind Turbines: Air Density and Turbulence Effects—Qollpana Wind Farm (Bolivia). *Proceedings*, *2*(8), 487. <https://doi.org/10.3390/ICEM18-05385>
- Mortensen, N. G. (2018). Wind resource assessment using the WAsP software Department of Wind Energy E Report 2019. DTU Wind Energy, N.174.
- Mortensen, N. G., Heathfield, D. N., Rathman, O., & Nielsen, M. (2014). Wind Atlas Analysis and Application Program: 11.2 Help Facility. Computer programme, Roskilde: Department of Wind Energy, Technical University of Denmark.
- Mortensen, N. G., Heathfield, D. N., Rathmann, O. S., & Nielsen, M. (2011). Wind Atlas Analysis and Application Program : WAsP 10 Help Facility. DTU Wind Energy.
- Mortensen, N. G., Landberg, L., Troen, I., Lundtang Petersen, E., Rathmann, O. S., & Nielsen, M. (2014). Wind Atlas Analysis and Application Program (WAsP). Vol. 3: Utility Programs, *Risø-I-666*, 1–133.
- Rosales Asensio, E., Borge Diez, D., Blanes Peiró, J. J., Pérez Hoyos, A., & Comenar Santos, A. (2019). Review of wind energy technology and associated market and economic conditions in Spain. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *101*, 415–427. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2018.11.029>
- SBS Energy Institut, I. (2013). Wind Power.
- Shoaib, M., Siddiqui, I., Rehman, S., Khan, S., & Alhems, L. M. (2019). Assessment of wind energy potential using wind energy conversion system. *Journal of Cleaner Production*, *216*, 346–360. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2019.01.128>
- Sveinbjornsson, S. (2013). *Analysis of WAsP in complex topographical conditions using measured production from a large scale wind farm*. University of Washington. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jvoice.2016.04.001>
- Tong, W. (2010). *Wind Power Generation and Wind Turbine Design*. USA: WIT Press.
- Vennell, R. (2013). Exceeding the Betz limit with tidal turbines. *Renewable Energy*, *55*, 277–285. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2012.12.016>
- Wagner, H., & Mathur, J. (2009). *Introducction to wind Energy Systems*. Germany: Library of Congress Control Number: 200993263. <https://doi.org/10.1360/zd-2013-43-6-1064>

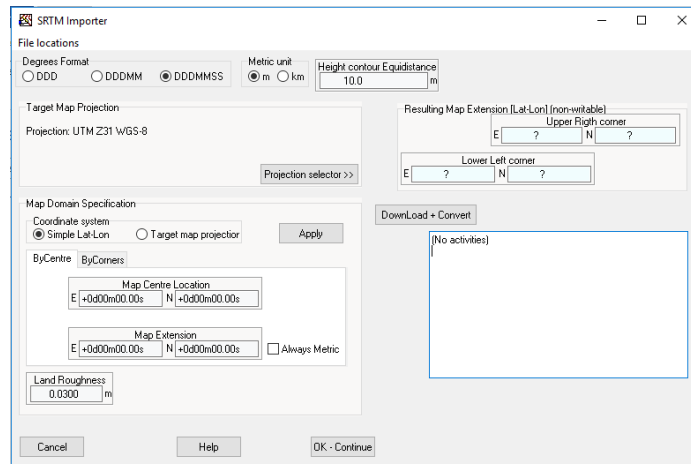
ANEXO

Manual descarga mapas de map Editor

1. Se abre al ventana de Wasp Map Editor, en ella se puede ir a la opción de importar mapas de la base de datos de SRTM maps



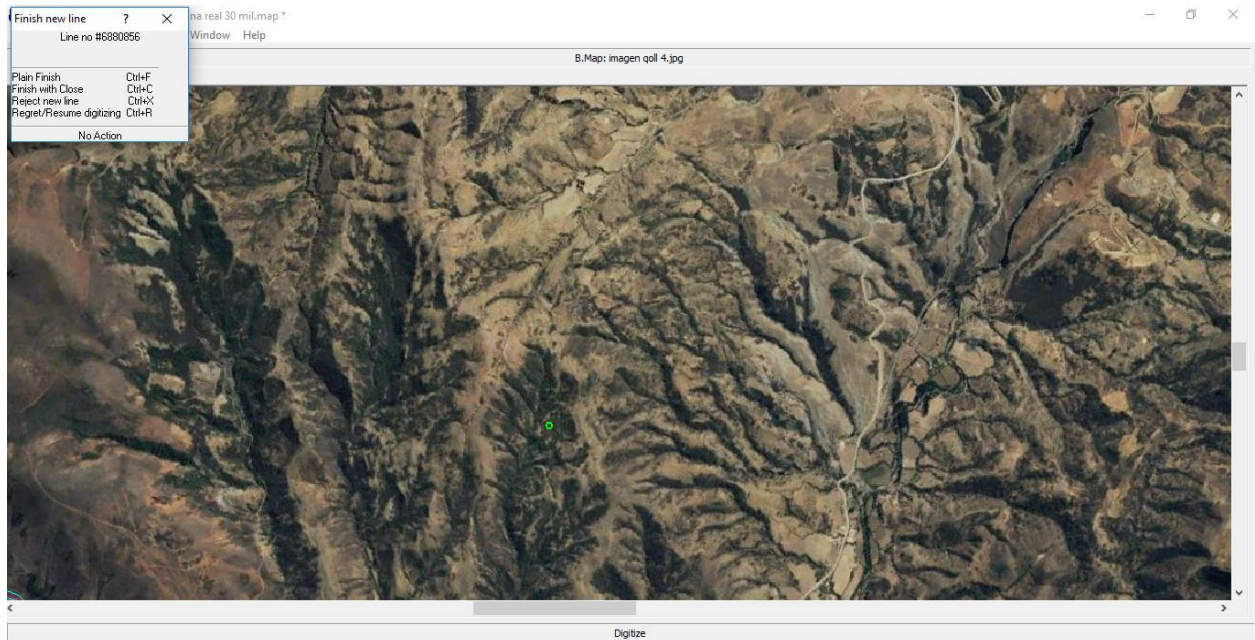
2. En la pantalla que se abre se debe especificar los datos requeridos como ser la zona UTM en la que se encuentra, las coordenadas del punto de referencia y la extensión del mapa.



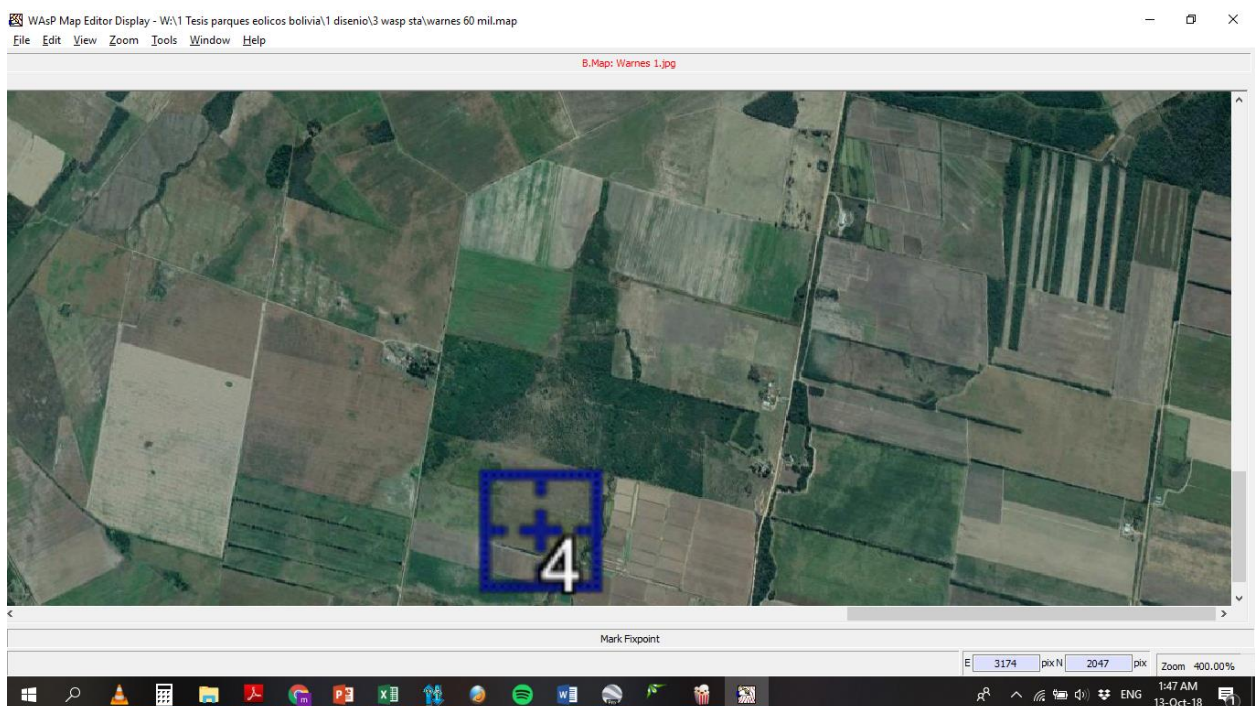
3. Una vez identificados estos parámetros se procede a descargar el mapa, es importante destacar que al momento de descargar el mapa el programa preguntara a qué rugosidad general se desea bajar el mapa, y se muestra por defecto que está a 0.03 m

Manual Map editor Rugosidades

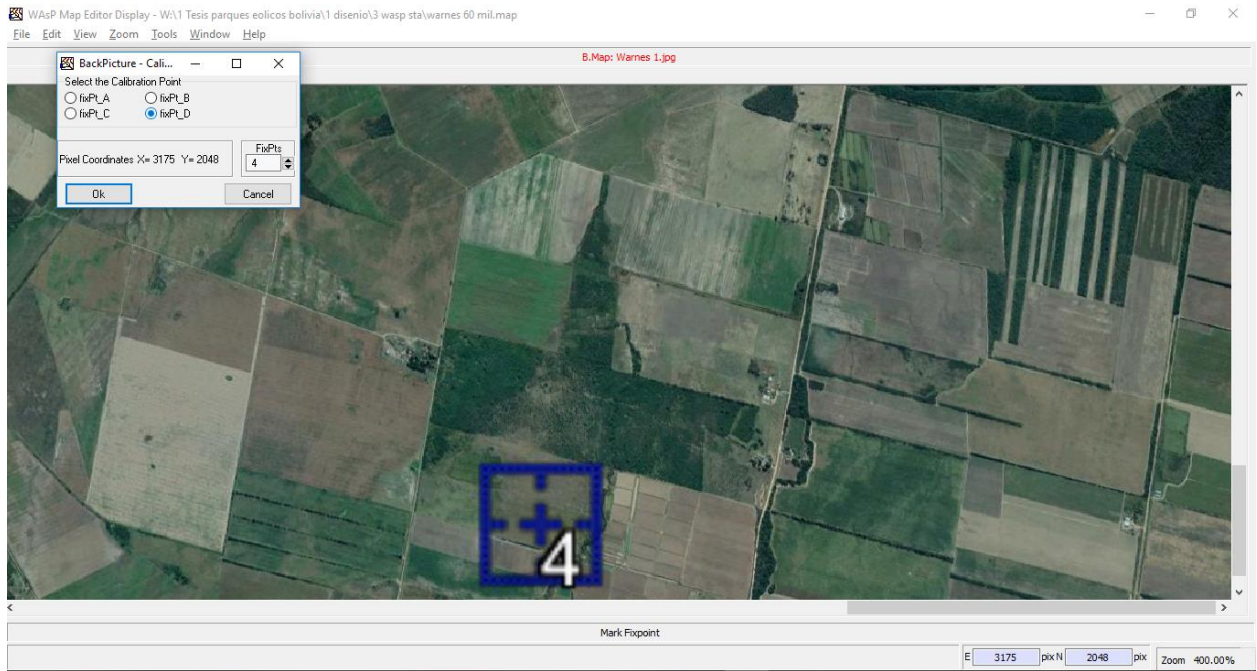
1. Abrir map editor, seleccionar FILE>OPEN y se selecciona el mapa que se desea poner la rugosidad.
2. Map editor tiene dos ventanas, se va a VIW> , de donde se abre otra ventana, donde muestra el mapa y la elevación del terreno, esta es una ventana donde se puede ir editando el mapa deseado.



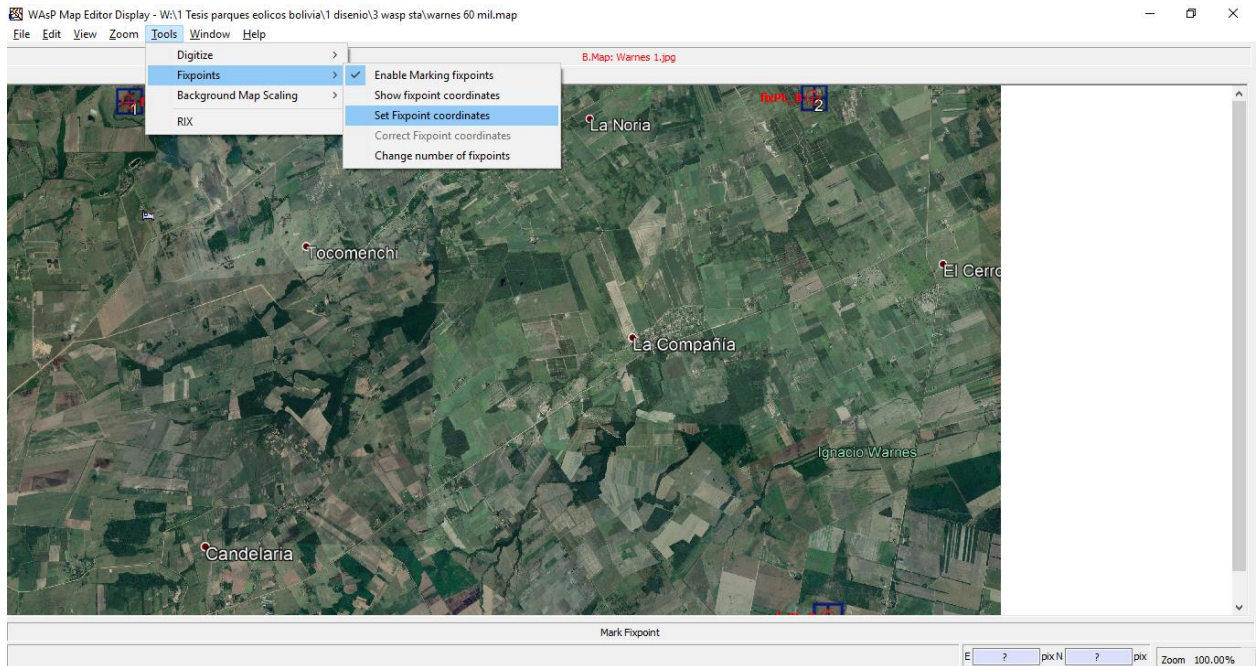
3. Identificar los puntos de referencia y marcarlos



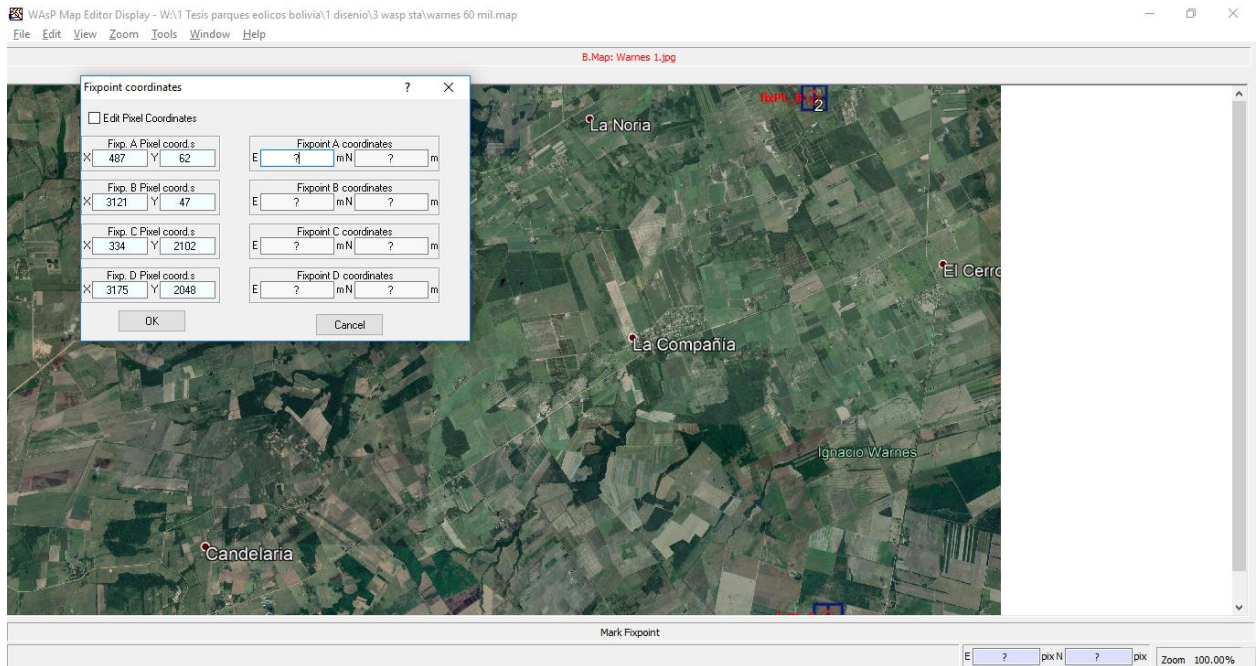
4. Una vez marcados los puntos de referencia que tienen que ser como mínimo 3 puntos se marca con un OK.



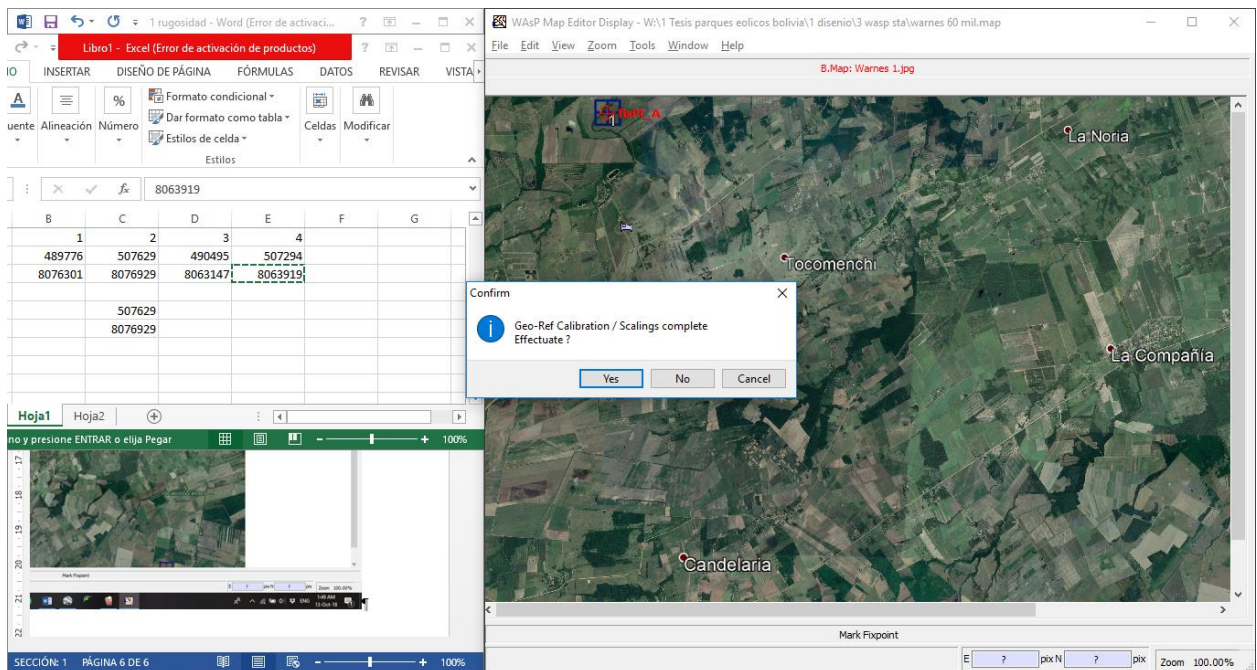
5. Una vez marcados los puntos de referencia se pone como fijar los puntos de referencia esto con el fin de darle las coordenadas correctas



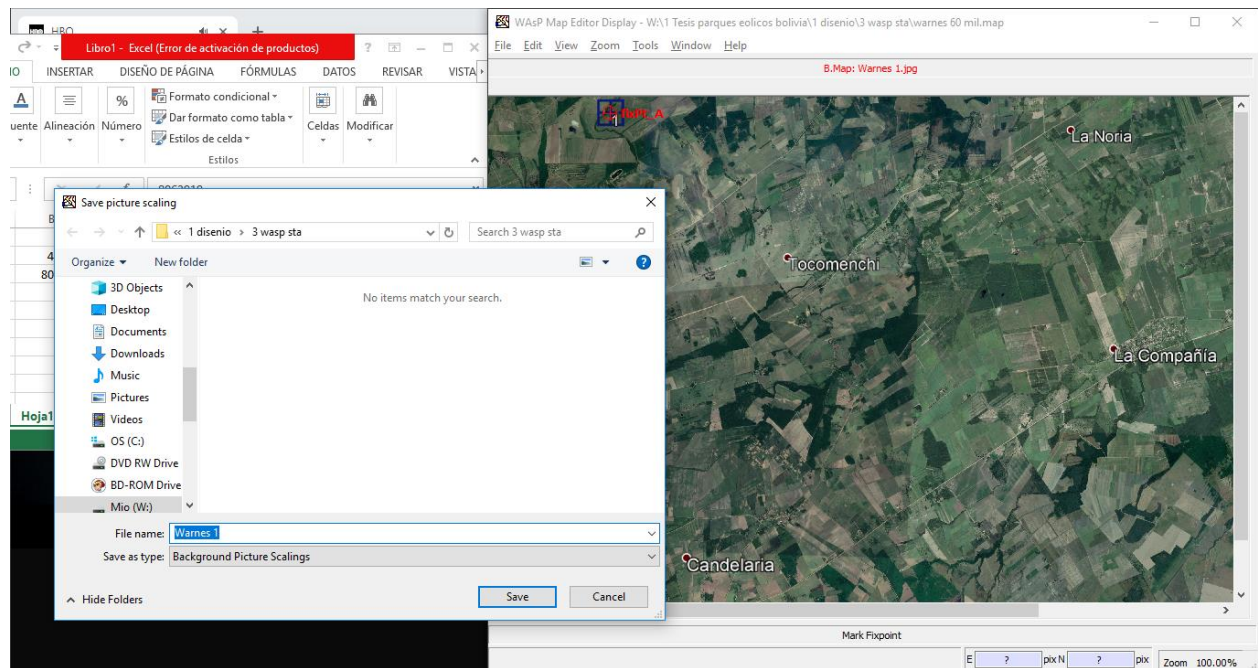
6. Luego se abre una ventana donde muestra los puntos definidos en el mapa en que se pretende trabajar.



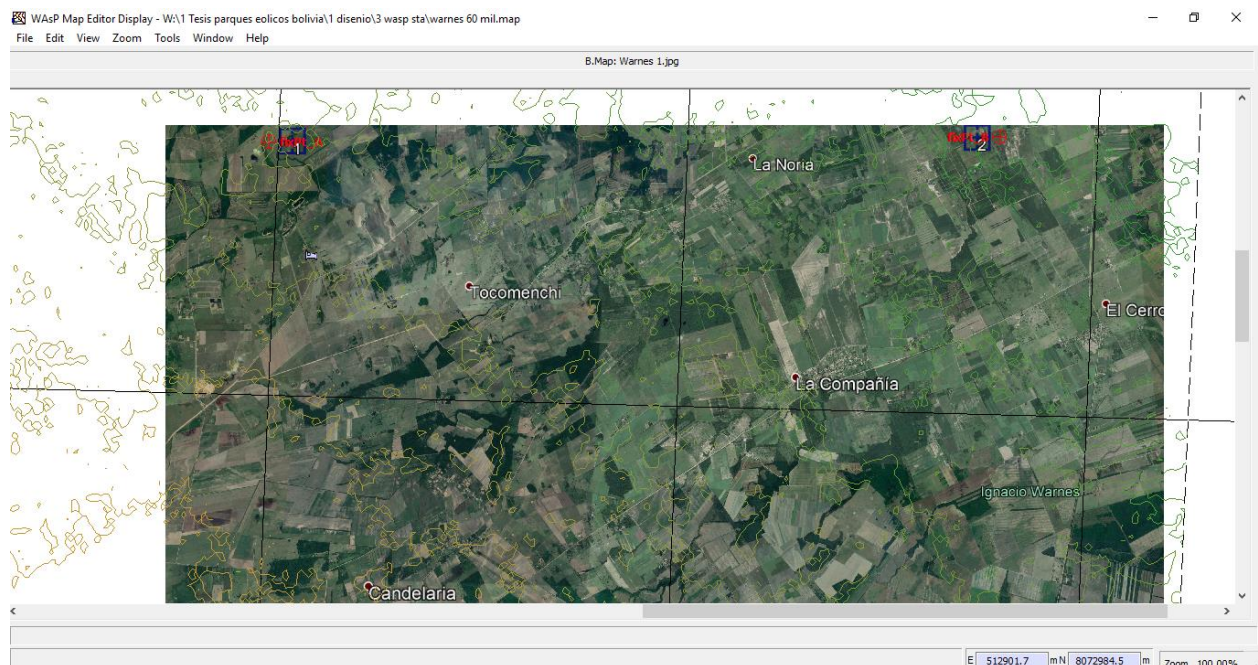
7. Una vez fijados los puntos el programa solicita si queremos fijar estos nuevos puntos de referencia en el cual se debe poner que sí.



8. Luego pedirá guardar los nuevos puntos de referencia, a la cual se pondrá en nombre se maca luego con guardar.



9. De esta manera ya se fijaron los puntos de referencia en el mapa que se requiere utilizar.



Los pasos de las verificaciones de coherencia se realizan al cargar un archivo de mapa, y se actualizan actualmente durante la edición del contorno, siempre que se hayan establecido las opciones de comprobación de coherencia correspondientes (en el punto de menú Herramientas | Consistencia de la ventana principal). Se tiene que tener en cuenta que las opciones de comprobación de coherencia dependen unas de otras como se indica en el esquema de dependencia de coherencia.

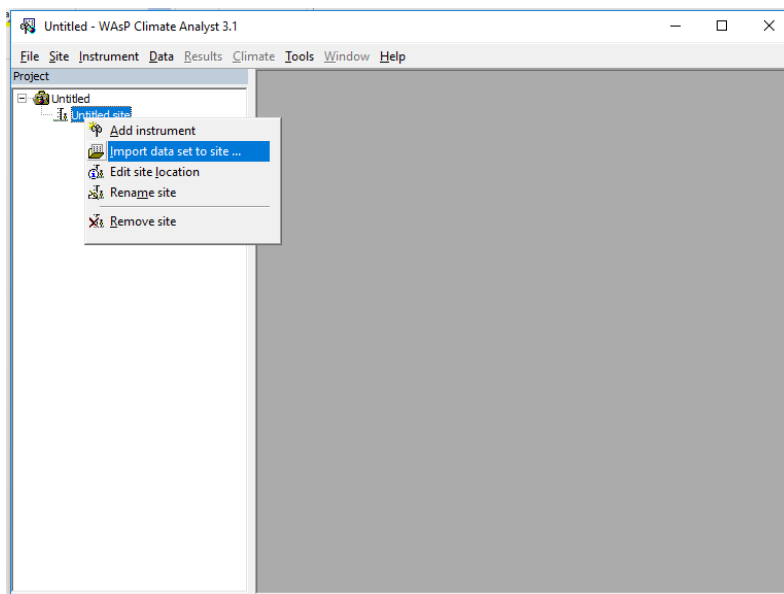
Una verificación de coherencia exitosa se indica con “0” en el campo “Finalización de los callejones sin salida”, el campo “Puntos cruzados” y el campo "Error de LFR".

Al guardar un archivo de mapa, se emitirá una advertencia en caso de que se hayan encontrado errores de consistencia de la rugosidad, incluidos también los casos en los que la verificación de la consistencia de la rugosidad no está completamente habilitada.

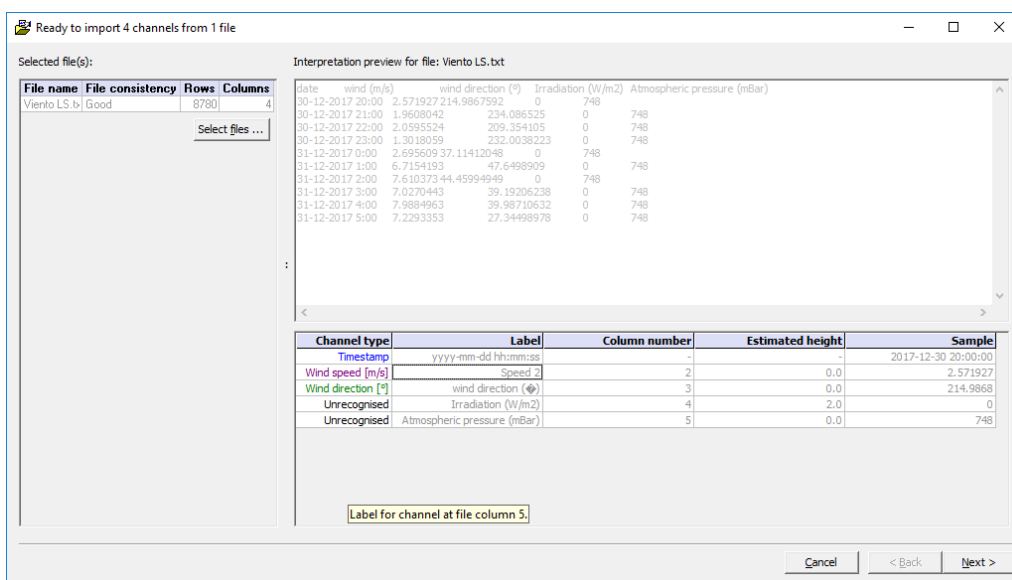
Las líneas de rugosidad con callejones sin salida se pueden corregir automáticamente, si es posible, mediante la opción de menú Edición automática Roughness Contour Joining (se aplicará a todas las líneas de rugosidad inconsistentes); como alternativa, las líneas se pueden corregir una a una mediante la edición manual en la ventana de visualización del mapa

Procedimiento tratamiento datos con WAsP Climate Analyst

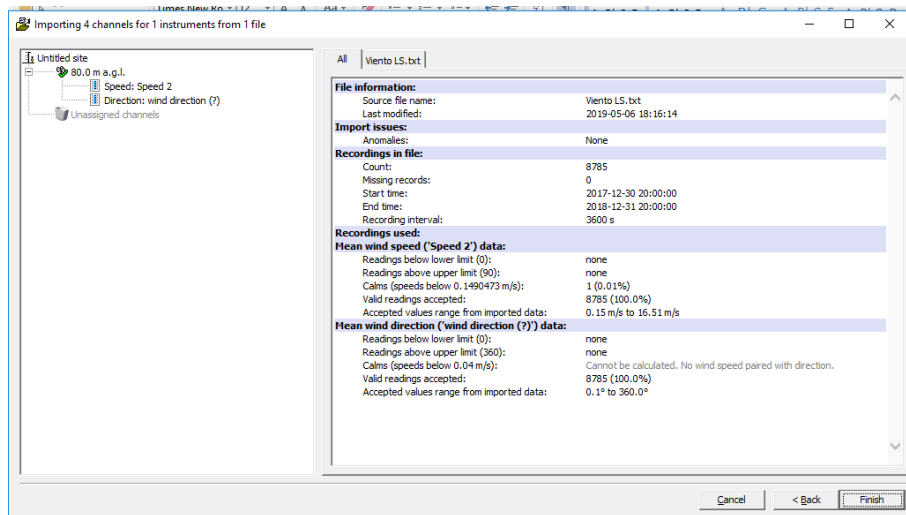
1. Antes de insertar los datos de viento a esta herramienta es recomendable tenerlos en formato *.txt, esto facilita al programa a realizar el tratamiento con mayor facilidad. Primero se debe ir a import data set to site.



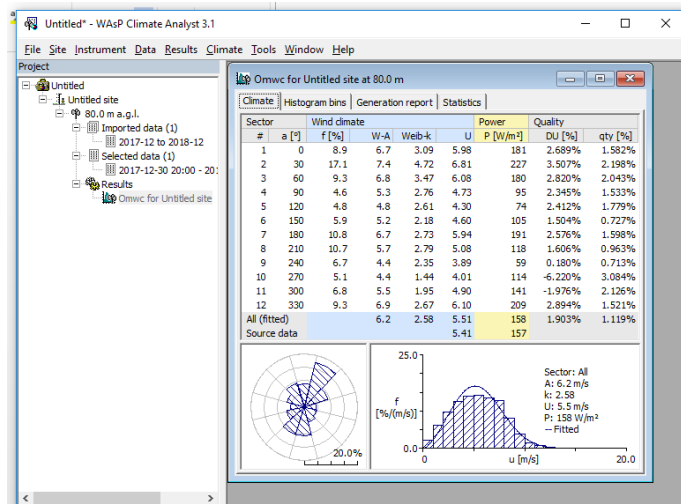
2. Se abrirá una ventana en la que muestra la forma de reconocer los datos, en este se tiene que identificar cuáles son los datos de tiempo, velocidad y Angulo del viento, luego se pasa al siguiente paso.



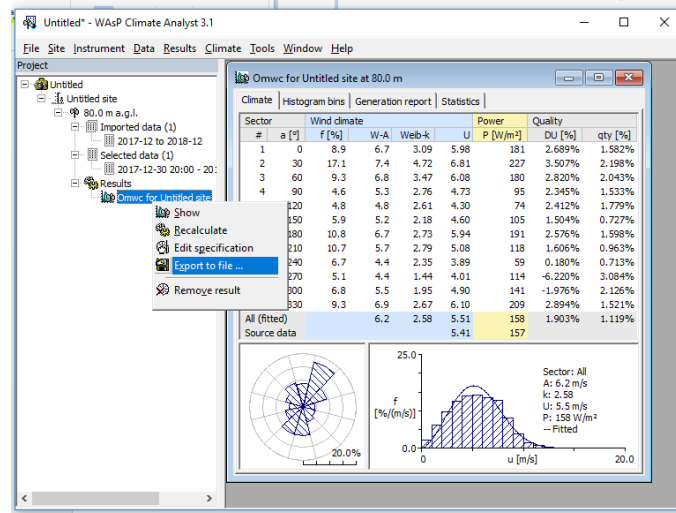
3. Finalmente hace el análisis de los datos y se pone finalizar el proceso



4. Finalmente en la parte de resultados se ejecuta la opción para que genere la rosa de viento y la curva de weibull.

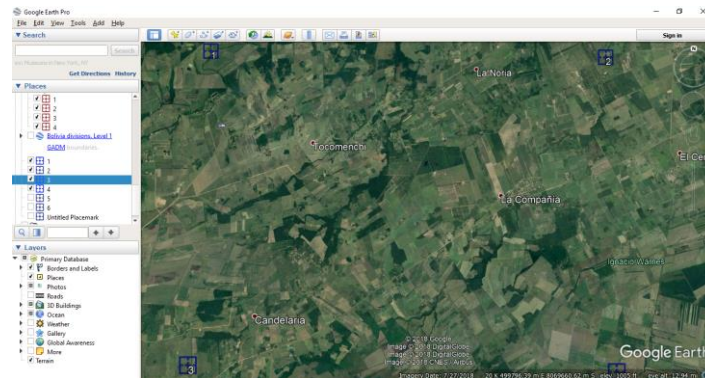


5. Una vez finalizado se debe ir a la opción exportar, este lo guardara en formato que puede ser leído por WAsP y por Openwind.

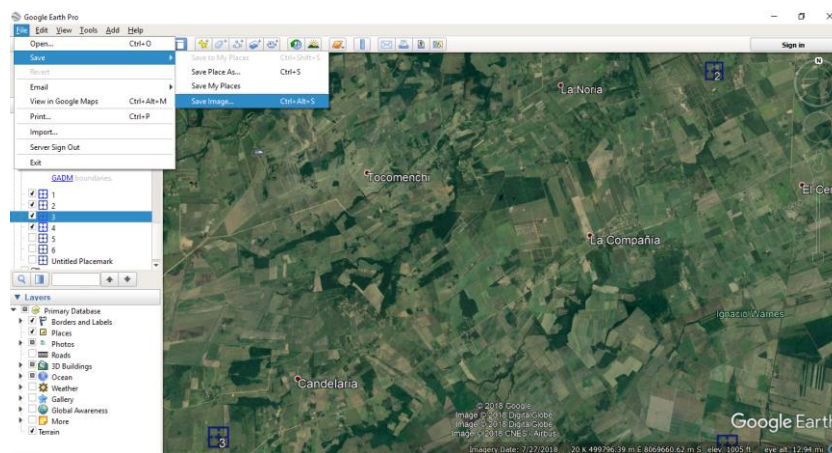


Manual descargar imagen de Google Earth Pro

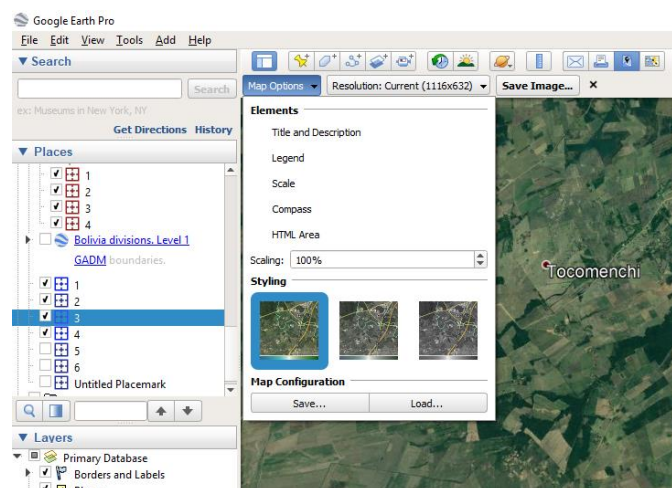
1. Identificar el área donde se desea descargar la imagen. Luego se marcan 4 puntos alrededor del área de referencia.



2. Una vez definido el área, se va a la opción EDIT>SAVE>SAVE IMAGE



3. Aparece una barra de herramientas, en map options seleccionar los elementos que se desea agregar a la imagen que se va a descargar.



También se selecciona en resolución la resolución que se requiera y finalmente se pone SAVE IMAGE. Se abre una ventana donde se pone el nombre con el cual se quiere guardar la imagen.