



1859

UNIVERSIDAD NACIONAL DE LOJA
ÁREA DE LA ENERGÍA, LAS INDUSTRIAS Y LOS RECURSOS NATURALES NO RENOVABLES

MAESTRÍA EN ELECTROMECAÁNICA

TÍTULO:

**CARACTERIZACIÓN DEL RECURSO EÓLICO EN LA PROVINCIA DE
LOJA, UTILIZANDO MODELOS COMPUTACIONALES**

Tesis de postgrado previo a
optar por el grado de Magíster
en Electromecánica.

AUTOR: Ing. Juan Carlos Solano Jiménez.

DIRECTOR: Ing. Jorge Luis Maldonado Correa, Mg.Sc.

LOJA-ECUADOR

2013

CERTIFICACIÓN

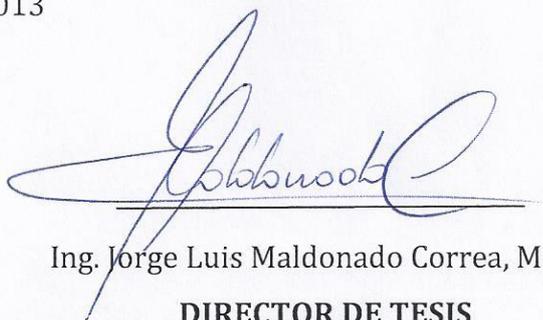
Ing. Jorge Luis Maldonado Correa, Mg.Sc

DIRECTOR DE TESIS

CERTIFICA:

Haber dirigido, asesorado, revisado y corregido el presente trabajo de tesis de postgrado, en su proceso de investigación cuyo tema versa en **“CARACTERIZACIÓN DEL RECURSO EÓLICO EN LA PROVINCIA DE LOJA, UTILIZANDO MODELOS COMPUTACIONALES”**, previa a la obtención del grado de Magíster en Electromecánica, realizado por el Señor Ingeniero: Juan Carlos Solano Jiménez, la misma que cumple con la reglamentación y políticas de investigación, por lo que autorizo su presentación, posterior sustentación y defensa.

Loja, 22 de julio de 2013



Ing. Jorge Luis Maldonado Correa, Mg.Sc.
DIRECTOR DE TESIS

AUTORÍA

Yo, Juan Carlos Solano Jiménez, declaro ser autor del presente trabajo de tesis, y eximo expresamente a la Universidad Nacional de Loja y a sus representantes jurídicos de posibles reclamos o acciones legales, por el contenido de la misma.

Adicionalmente acepto y autorizo a la Universidad Nacional de Loja, la publicación de mi tesis en el Repositorio Institucional – Biblioteca Virtual.

Autor: Ing. Juan Carlos Solano Jiménez

Firma:  _____

Cédula: 1103401475

Fecha: 13 de septiembre de 2013

CARTA DE AUTORIZACIÓN

CARTA DE AUTORIZACIÓN DE TESIS POR PARTE DEL AUTOR, PARA LA CONSULTA, REPRODUCCIÓN PARCIAL O TOTAL, Y PUBLICACIÓN ELECTRÓNICA DEL TEXTO COMPLETO.

Yo, Juan Carlos Solano Jiménez, declaro ser autor de la tesis titulada: "**CARACTERIZACIÓN DEL RECURSO EÓLICO EN LA PROVINCIA DE LOJA, UTILIZANDO MODELOS COMPUTACIONALES**", como requisito para optar al grado de: **Magíster en Electromecánica**; autorizo al Sistema Bibliotecario de la Universidad Nacional de Loja para que con fines académicos, muestre al mundo la producción intelectual de la Universidad, a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera en el Repositorio Digital Institucional:

Los usuarios pueden consultar el contenido de este trabajo en el RDI, en las redes de información del país y del exterior, con las cuales tenga convenio la Universidad.

La Universidad Nacional de Loja, no se responsabiliza por el plagio o copia de la tesis que realice un tercero.

Para constancia de esta autorización, en la ciudad de Loja, a los trece días del mes de septiembre del dos mil trece, firma el autor.

Firma:



Autor: Ing. Juan Carlos Solano Jiménez.

Cédula: 1103401475

Dirección: Ramón Pinto 06-24 y Colón. **Correo Electrónico:** juan.solano@unl.edu.ec

Teléfono: 07 2581218

Celular: 0994772254

DATOS COMPLEMENTARIOS:

Director de Tesis: Ing. Jorge Luis Maldonado Correa, Mg.Sc.

Tribunal de Grado:

Ing. Ángel Alberto Jiménez León, Mg.Sc. (Presidente)

Ing. Jorge Patricio Muñoz Vizhñay, Mg.Sc.

Ing. Ing. Thuesman Estuardo Montaña Peralta, Mg.Sc.

PENSAMIENTO

“A lo largo del espacio hay energía. ... es una mera cuestión de tiempo hasta que los hombres tengan éxito en sus mecanismos vinculados al aprovechamiento de esa energía”

Nikola Tesla

DEDICATORIA

A Dios, por derramar muchas bendiciones sobre mí.

A mis padres, Luis Alberto y Ana María, por estar siempre conmigo y darme su apoyo incondicional. A mis hermanos, María Fernanda, Karina y Luis Alberto, quienes son mi ejemplo a seguir.

De manera muy especial dedico este trabajo a Neptalí, Catalina, Marco y Melva, por su salud y bienestar.

A Valeria, quien siempre estuvo conmigo dándome su apoyo.

La superación profesional es un camino gratificante hacia el éxito.

Juan Carlos

AGRADECIMIENTO

Dejo constancia de mi eterno agradecimiento:

A la Universidad Nacional de Loja, y al Área de la Energía, las Industrias y los Recursos Naturales no Renovables, que desde sus autoridades, cuerpo docente, personal administrativo y trabajadores, me han permitido superar profesionalmente.

Al CIRCE (Centro de Investigaciones de Recursos y Consumos Energéticos) de Zaragoza, España, representados por los investigadores Ana Mar Rodríguez, Enrique Telmo, y en especial a Carlos Pueyo, quienes con su asesoramiento fueron un puntal fundamental en el desarrollo de este proyecto.

A los Ingenieros, Thuesman Montaña y Marco Rojas, que con su liderazgo han impulsado y apoyado todos los proyectos de investigación que derivaron en este proyecto de tesis.

Al Doctor Miguel Ángel Caraballo, que lideró e impulsó la creación de la Maestría en Electromecánica, y fue un aporte fundamental en el planteamiento de tesis que derivó en este proyecto.

A la Dra. Emmanuelle Quentin, quien ha asesorado y revisado este proyecto de tesis, además de aportar enormemente con su experiencia.

A Jorge Maldonado, como director de tesis y compañero de investigación, ha trabajado esforzadamente para poder cumplir con este objetivo.

A Orlando Álvarez, un excelente profesional que ha aportado con su asesoramiento y experiencia en el proyecto de investigación.

A Guadalupe Roa, por su colaboración y trabajo eficiente.

Juan Carlos

TABLA DE CONTENIDOS

CERTIFICACIÓN	I
AUTORÍA	II
CARTA DE AUTORIZACIÓN	III
PENSAMIENTO	IV
DEDICATORIA	V
AGRADECIMIENTO	VI
TABLA DE CONTENIDOS	VII
FIGURAS	IX
TABLAS	XI
a. TÍTULO	1
b. RESUMEN	2
ABSTRACT	3
c.- INTRODUCCIÓN	4
d.- REVISIÓN DE LITERATURA	8
d.1. CAPÍTULO I: LA ENERGÍA EÓLICA	8
d.1.1. GENERALIDADES	8
d.1.2. SITUACIÓN ACTUAL DE LA ENERGÍA EÓLICA EN EL MUNDO	8
d.1.3. EL RECURSO EÓLICO EN EL ECUADOR	10
d.1.4. EL RECURSO EÓLICO EN LA PROVINCIA DE LOJA	11
d.2. CAPÍTULO II: EL RECURSO EÓLICO	13
d.2.1. NATURALEZA DEL VIENTO	13
d.2.2. VIENTOS EN ECUADOR	15
d.2.3. VELOCIDAD DEL VIENTO	15
d.2.3.1. DISTRIBUCIÓN DE WEIBULL	18
d.2.4. DIRECCIÓN DEL VIENTO	21
d.2.4.1. ROSA DE FRECUENCIAS	22
d.2.4.2. ROSA DE VELOCIDADES	23
d.2.4.3. ROSA DE ENERGÍA	23
d.3 CAPÍTULO III: MEDICIÓN DEL VIENTO	25
d.3.1. ESTACIONES METEOROLÓGICAS DEL INAMHI	25
d.3.1.1. INFORMACIÓN BASE	26
d.3.2. ESTACIONES METEOROLÓGICAS CONVENCIONALES	26
d.3.2.1. INSTRUMENTACIÓN	27
d.3.3. ESTACIONES METEOROLÓGICAS AUTOMÁTICAS	30
d.3.3.1. INSTRUMENTACIÓN	32
d.3.4. TRATAMIENTO DE LA INFORMACIÓN	34
d.4 CAPÍTULO IV: MODELOS NUMÉRICOS COMPUTACIONALES	35
d.4.1. MODELOS DE DINÁMICA DE LOS FLUIDOS COMPUTACIONAL	36

d.4.2 MODELOS LINEALIZADOS	38
d.4.3. COMPARACIÓN ENTRE MODELOS	38
d.4.4. ELECCIÓN DE SOFTWARE A UTILIZAR	40
d.4.5. WAsP (Wind Atlas Analysis and Application Program).....	41
d.4.5.1. METODOLOGÍA DE WASP	41
d.4.6. OROGRAFÍA Y RUGOSIDAD	46
e.- MATERIALES Y MÉTODOS	51
e.1 Materiales.....	51
e.2 Métodos.....	51
e.2.1. METODOLOGÍA Y PROCEDIMIENTO.....	52
1. DATOS DE PARTIDA	52
2. CAMPAÑA DE MEDIDAS DE VIENTO	54
3. ESTACIONES DE MEDIDA.....	54
4. VELOCIDADES MEDIAS MENSUALES	55
5. CARACTERIZACIÓN DEL PERIODO DE REFERENCIA	56
6. ELECCIÓN DEL PERIODO DE REFERENCIA.....	57
f.- RESULTADOS.....	58
1. RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE LAS ESTACIONES.....	58
1.1. ESTACIÓN 95001_VILCABAMBA (10 m).....	58
1.2. Estación 95002_ CHUQUIRIBAMBA (10 m).....	59
1.3. Estación 95003_ YANGANA (10 m).....	61
1.4. Estación 95004_ CARIAMANGA (10 m).....	62
1.5. Estación 95005_ EL ALMENDRAL (10 m).....	64
1.6. Estación 95006_ YANGANA (10 m).....	65
1.7. Estación 95007_ ZAPOTILLO (10 m).....	67
1.8. Estación 95008_ QUILANGA (10 m)	68
1.9. Estación 95009_ AMALUZA (10 m)	70
1.10. Estación 95010_ EL INGENIO (10 m)	71
2. PERFIL VERTICAL DE VIENTO.....	73
3. MODELIZACIÓN	74
3.1. DATOS DE ENTRADA DEL MODELO.....	74
3.2. DATOS METEOROLÓGICOS.....	75
3.3. DATOS TOPOGRÁFICOS.....	75
3.4. MALLA DE CÁLCULO	77
3.5. RESULTADO DE LA MODELIZACIÓN.....	80
g.- DISCUSIÓN	82
h.- CONCLUSIONES.....	84
i.- RECOMENDACIONES	866
j.- BIBLIOGRAFÍA	877

FIGURAS

Figura 1. Capacidad Instalada a Nivel Mundial [MW].....	9
Figura 2. Evolución y pronóstico de la Capacidad Instalada a Nivel Mundial [MW].....	10
Figura 3. Fotografía del Parque Eólico Villonaco.....	12
Figura 4. Fotografía de la Superficie de la Tierra en Infrarrojo.	13
Figura 5. Dirección predominante de los vientos en el planeta.	14
Figura 6. Datos de la estación meteorológica automática “Changaimina” de la Provincia de Loja.	16
Figura 7: Ejemplo de una Distribución de Weibull para velocidades de viento.	19
Figura 8. Rosa de frecuencias	22
Figura 9. Rosa de velocidades	23
Figura 10. Rosa de energía.....	24
Figura 11. Estación Meteorológica convencional “La Argelia” – Loja.....	28
Figura 12. Captura de pantalla de archivo de compilación en Excel, de las estaciones meteorológicas convencionales de todo el Ecuador.	28
Figura 13. Ubicación de las estaciones meteorológicas convencionales del INAMHI en la RSE.....	29
Figura 14. Fotografía de una estación meteorológica automática instalada en la provincia de Loja.....	30
Figura 15. Ubicación espacial de las 10 estaciones meteorológicas automáticas.....	31
Figura 16. Captura de pantalla de documento Excel, con los datos horarios de velocidad del viento de la estación “Vilcambamba” de la Provincia de Loja.	32
Figura 17. Anemoveleta instalada en las estaciones automáticas de la provincia de Loja.	33
Figura 18. Mapas eólicos a 50 metros de altura, para modelos con diferentes resoluciones de malla.	37
Figura 19. Resolución de las ecuaciones de Navier-Stokes en 3D.....	37
Figura 20. La metodología del atlas de viento utilizada por el WASP	42
Figura 21. Incrementos relativos de velocidad del flujo sobre una colina a 10 m sobre el suelo. Las medidas se indican con puntos; los resultados del WASP con cuadrados. Las líneas representan las predicciones de otros dos modelos de linealización del flujo.....	44
Figura 22. Rosa de viento y ajustes de Weibull estimado por WASP para una serie de datos meteorológicos.	45
Figura 23. Mapa de orografía utilizado por WASP.	47
Figura 24. Ejemplos de clasificaciones estándares de terreno en función de su rugosidad.....	48
Figura 25. Modelo de altitud de la Región Sur del Ecuador.	50
Figura 26. Ubicación de la provincia de Loja - Ecuador.....	52
Figura 27. Posición de las estaciones meteorológicas dentro de la provincia de Loja.	53
Figura 28. Evolución temporal de la velocidad media del viento. Datos horarios.....	56
Figura 29. Frecuencia de viento por intervalos de velocidad y curva de duración del viento en la estación 95001 a 10 m de altura de medida.	58

Figura 30. Rosa de direcciones medias de viento y rosa de velocidad media del viento a 10 m de altura durante el periodo de referencia. Estación 95001.	59
Figura 31. Frecuencia de viento por intervalos de velocidad y curva de duración del viento en la estación 95002 a 10 m de altura de medida.	60
Figura 32. Rosa de direcciones medias de viento y rosa de velocidad media del viento a 10 m de altura durante el periodo de referencia. Estación 95002.	60
Figura 33. Frecuencia de viento por intervalos de velocidad y curva de duración del viento en la estación 95003 a 10 m de altura de medida.	61
Figura 34. Rosa de direcciones medias de viento y rosa de velocidad media del viento a 10 m de altura durante el periodo de referencia. Estación 95003.	62
Figura 35. Frecuencia de viento por intervalos de velocidad y curva de duración del viento en la estación 95004 a 10 m de altura de medida.	63
Figura 36. Rosa de direcciones medias de viento y rosa de velocidad media del viento a 10 m de altura durante el periodo de referencia. Estación 95004.	63
Figura 37. Frecuencia de viento por intervalos de velocidad y curva de duración del viento en la estación 95005 a 10 m de altura de medida.	64
Figura 38. Rosa de direcciones medias de viento y rosa de velocidad media del viento a 10 m de altura durante el periodo de referencia. Estación 95005.	65
Figura 39. Frecuencia de viento por intervalos de velocidad y curva de duración del viento en la estación 95006 a 10 m de altura de medida.	66
Figura 40. Rosa de direcciones medias de viento y rosa de velocidad media del viento a 10 m de altura durante el periodo de referencia. Estación 95006.	66
Figura 41. Frecuencia de viento por intervalos de velocidad y curva de duración del viento en la estación 95007 a 10 m de altura de medida.	67
Figura 42. Rosa de direcciones medias de viento y rosa de velocidad media del viento a 10 m de altura durante el periodo de referencia. Estación 95007.	68
Figura 43. Frecuencia de viento por intervalos de velocidad y curva de duración del viento en la estación 95008 a 10 m de altura de medida.	69
Figura 44. Rosa de direcciones medias de viento y rosa de velocidad media del viento a 10 m de altura durante el periodo de referencia. Estación 95008.	69
Figura 45. Frecuencia de viento por intervalos de velocidad y curva de duración del viento en la estación 95009 a 10 m de altura de medida.	70
Figura 46. Rosa de direcciones medias de viento y rosa de velocidad media del viento a 10 m de altura durante el periodo de referencia. Estación 95009.	71
Figura 47. Frecuencia de viento por intervalos de velocidad y curva de duración del viento en la estación 95010 a 10 m de altura de medida.	72
Figura 48. Rosa de direcciones medias de viento y rosa de velocidad media del viento a 10 m de altura durante el periodo de referencia. Estación 95010.	72

Figura 49. Mapa de 2D con las curvas de nivel y rugosidad y las estaciones usadas en la modelización.....	76
Figura 50. Mapa en 3D de la provincia de Loja.....	77
Figura 51. Mapa con las curvas de nivel, la ubicación de las estaciones meteorológicas y la extensión de los mallados.....	78
Figura 52. Mapa con las áreas de asignación de resultados según la torre más representativa.....	79
Figura 53. Mapa de isoventas a 80 m de altura de la provincia de Loja.....	80
Figura 54. Velocidad promedio anual, con resolución de 1 km a 80 metros de altura.....	81

TABLAS

Tabla 1. Proyectos previstos de generación eólica en el Ecuador.....	11
Tabla 2. Localidades con potencialidades eoloenergéticas en el Ecuador.....	11
Tabla 3. Escala de velocidad del viento.....	17
Tabla 4. Rango de ángulos de una distribución de 12 sectores.....	22
Tabla 5. Fuentes de información eólica utilizadas en el proyecto.....	26
Tabla 6. Asignación y ubicación de 10 estaciones meteorológicas automáticas.....	31
Tabla 7. Incidencias de los datos de las estaciones automáticas.....	34
Tabla 8. Resultados de comparaciones entre modelos comerciales: un modelo CFD y uno de flujo linealizado.....	39
Tabla 9. Clasificación estándar de terreno en función de su longitud y clase de rugosidad.....	48
Tabla 10. Información de las estaciones meteorológicas.....	54
Tabla 11. Periodo de referencia y velocidad media acumulada durante el periodo completo de medidas horarias de las estaciones meteorológicas.....	57
Tabla 12. Velocidad media medida durante el periodo de referencia y perfil vertical y velocidad a 80 m estimada por WASP.....	74

a. TÍTULO

**CARACTERIZACIÓN DEL RECURSO EÓLICO EN LA
PROVINCIA DE LOJA, UTILIZANDO MODELOS
COMPUTACIONALES**

b. RESUMEN

El presente proyecto de tesis de postgrado, es parte del Proyecto de Investigación “Desarrollo de modelos espacio temporales de variables solares y eólicas, para estimar el potencial energético en la Región Sur del Ecuador”, iniciado en julio de 2011 con una duración de veinticuatro meses, cofinanciado por la Secretaría Nacional de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación (SENESCYT), y da cumplimiento con la matriz del marco lógico presentada y aprobada por dicha Secretaría.

El informe de tesis, presenta como resultado final, un mapa eólico de la Provincia de Loja, utilizando datos de estaciones meteorológicas automáticas pertenecientes al Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI). Se presenta información sobre el Recurso Eólico en la Provincia de Loja, profundizando en los temas de Potencial Eólico, Caracterización del Viento, e Instrumentos de medición.

Se hace un análisis de los modelos numéricos usados para caracterizar el recurso eólico. Se utilizó el Programa WAsP , con una resolución horizontal de 1 km, para la información cartográfica se utilizó la imagen del Shuttle Radar Topography Mission de la NASA, y para los datos de rugosidad se consideró información gráfica de Google Earth con Resolución 1:10.000.

Se presenta la metodología utilizada, y se analizan los resultados conseguidos, entre los cuales constan: un archivo en formato excel, con una resolución horizontal de 1 km que cubre toda la provincia de Loja, en donde se incluyen las variables de velocidad media, rosa de direcciones (considerando 16 sectores de ancho 22.5°), coeficientes A y k de la distribución Weibull, y la densidad de potencia, de igual manera, utilizando un SIG (Sistema de Información Geográfico), se obtiene de forma gráfica el resultado global del mapa eólico de la provincia de Loja a 80 m de altura.

Finalmente se redactan las conclusiones y recomendaciones del presente informe.

ABSTRACT

This graduate thesis project, is part of the Research Project "Development of temporary space models of solar and eolic variables, to estimate the energy potential in the Southern Region of Ecuador". It started in July 2011 within a twenty-four months period, co-financed by the National Secretary of Higher Education, Science, Technology and Innovation (SENESCYT), this project fulfills the logic-frame model presented and approved by this Secretary.

As a concluding result the thesis report provides an eolic map of the province using data obtained from the automatic meteorological stations that belong to the National Institute of Meteorology and Hydrology (INAMHI). Information regarding the Eolic Resources in the province of Loja is presented, getting deeper in topics such as Eolic potential, Characterization of the Wind, and measuring instruments.

An analysis of the numeric models used to describe the eolic resource was developed. The Program WAsP was applied with a horizontal resolution of 1 km, for the cartographic information, the image from the Shuttle Radar Topography Mission of NASA was used, and for the ruggedness data, graphic information of Google Earth with Resolution 1:10.000 was considered.

The methodology applied throughout the process is presented and the results that were obtained are also analyzed, in particular: an Excel format file of an horizontal resolution of 1 km covering the whole province of Loja, with data of average wind speed, wind directions (considering 16 sectors of 22.5° width), A and k coefficients of the Weibull distribution, and power density. Moreover, in a GIS (Geographic Information System), the global result in graphical format is obtained as a wind map of Loja province at 80 m height.

To sum up, the conclusions and recommendations are written.

c.- INTRODUCCIÓN

La Universidad Nacional de Loja como institución de educación superior y de investigación en la Región Sur del Ecuador, considera necesario impulsar acciones específicas para el aprovechamiento de los recursos naturales no renovables, y en base a ello, propiciar la conservación del ambiente.

Uno de los objetivos que la UNL se propuso alcanzar dentro del “Quinto Plan de Desarrollo Institucional 2008 – 2013” señala: *“En lo que se refiere a los requerimientos energéticos de la RSE, la UNL impulsa actividades investigativas orientadas a mejorar técnicas de aprovechamiento de las energías alternativas renovables, como la solar, eólica, hidráulica, y la procedente de biomasa. La Institución contribuye también en la socialización de metodologías para la gestión energética, es decir, la búsqueda de mayor eficiencia en el uso de la energía, principalmente eléctrica y térmica.”*

Actualmente la UNL tiene en marcha el Proyecto 754 denominado “Desarrollo de modelos espacio temporales para estimar el potencial solar y eólico en la Región Sur del Ecuador”, co – financiado por la SENESCYT, con un valor de USD 144,102.08, y un aporte institucional de la UNL de USD 16,011.34. Este proyecto se viene ejecutando con normalidad desde julio 2011, y se prevé culminar en diciembre de 2013. El Director del proyecto es el Ing. Thuesman Montaña, y dentro del equipo de investigación se encuentran el Ing. Jorge Maldonado, la PhD. Emmanuelle Quentin y mi persona.

Los resultados del proyecto 754, contribuirán significativamente al desarrollo de nuevos proyectos orientados a la utilización de energías renovables en la Región Sur del Ecuador (Solar térmica, solar fotovoltaica, eólica). Se elaborará metodologías geomáticas para obtención de mapas de toda la RSE, con el fin de obtener en cada punto geográfico la información de la radiación solar y velocidad del viento, a nivel espacio - temporal.

Estos mapas determinarán qué sitios de la RSE cuentan con buen potencial, y se escogerán con evaluación multicriterios los lugares en donde se ubicarán nuevas estaciones meteorológicas.

A nivel nacional, el INAMHI es el Servicio Meteorológico e Hidrológico del Ecuador creado por Ley, como una necesidad y un derecho fundamental de la comunidad, con capacidad y la obligación de suministrar información vital sobre el tiempo, el clima y los recursos hídricos del pasado, presente y futuro, que necesita conocer el país para la protección de la vida humana y los bienes materiales. El INAMHI, envió una carta de auspicio a la UNL, indicando que ayudará con la entrega de información necesaria de estaciones meteorológicas para que el proyecto 754 cumpla sus objetivos.

En noviembre de 2011, la Oficina de Cooperación de la Embajada de Bélgica en Ecuador CTB, lanzó una convocatoria pública de un PROGRAMA DE BECAS dirigido a las Universidades y Escuelas Politécnicas del Ecuador, para capacitación de docentes e investigadores que requieran profundizar su formación en un campo. En abril de 2012, se recibió la comunicación por parte de la CTB, en la que se manifestaba que la propuesta presentada por los Ingenieros Jorge Maldonado y Juan Carlos Solano ha sido calificada y se logró que el curso sea dictado por el CENTRO DE INVESTIGACIÓN DE RECURSOS Y CONSUMOS ENERGÉTICOS CIRCE de la Universidad de Zaragoza de España, quienes gozan de una dilatada experiencia y reconocimiento internacional en el campo de las energías renovables. A finales del mes de Octubre de 2012, el Profesor Carlos Pueyo Rufas, dictó un curso denominado “APLICACIÓN DE SISTEMAS DE MEDICIÓN REMOTA, GENERACIÓN DE MAPAS Y APLICACIÓN DE SOFTWARE EN PROYECTOS CON FUENTES RENOVABLES DE ENERGÍA”, que se centró en el aprovechamiento de la energía eólica, y servirá de base para futuros proyectos presentados en este campo.

Con la asesoría técnica del CIRCE, y la investigación realizada hasta la presente fecha en el Proyecto 754, se ha elaborado el presente proyecto de investigación, con la generación de un mapa para la caracterización del recurso eólico en la provincia de Loja, y la utilización de modelos computacionales, siendo la información de entrada los datos de diez estaciones meteorológicas del INAMHI, ubicadas en distintos sectores de la Provincia de Loja. Este proyecto de investigación será de vital importancia para poder cumplir la Actividad 2.1 del proyecto 754. Dentro de la justificación presentada en el proyecto 754 a la SENESCYT, se plantea la ejecución de un proyecto de investigación dentro del programa de la Maestría en Electromecánica que la UNL tiene actualmente.

El **Objeto de Investigación** es el potencial eólico en la Provincia de Loja, y se fundamenta en las siguientes unidades de observación:

- Medición de variables (velocidad y dirección del viento) en distintos lugares de la Provincia de Loja.
- Análisis de las variables medidas.
- Validación de datos de las estaciones meteorológicas en la Provincia de Loja.
- Modelo del potencial eólico, utilizando el software WAsP.
- Metodología para un ulterior uso en otros sectores.
- Aprovechamiento de energías alternativas renovables.

En la Región Sur del Ecuador no existen instituciones públicas ni privadas que proporcionen información sobre datos sobre el potencial eólico y solar en una localidad específica. El INAMHI brinda datos de estaciones meteorológicas, pero no elabora un modelo de interpolación para otros sectores inclusive cercanos a éstas.

Los resultados del presente proyecto son de mucha importancia ya que se ha elaborado una metodología para el monitoreo del potencial eólico en la Provincia de Loja, en base a datos reales de estaciones meteorológicas supervisadas por el INAMHI. Esta metodología permitirá un posterior estudio del Potencial Eólico en toda la Región Sur del Ecuador.

Actualmente, el MEER (Ministerio de Electricidad y Energía Renovable), a través del INER (Instituto Nacional de Energía Renovable), publicó en el año 2013, un mapa eólico de todo el Ecuador. Sin embargo, el presente tema de investigación no implicaría una duplicidad investigativa, sino mas bien, sería una herramienta para contrastar resultados, debido a que el mapa eólico del Ecuador utiliza modelos de meso escala (imágenes satelitales) para su desarrollo, mientras que el presente proyecto utilizó datos puntuales (estaciones meteorológicas).

Las aplicaciones y posterior uso de los resultados, contribuirán con información cualitativa del recurso eólico en la Provincia de Loja, para futuros proyectos de desarrollo en energías renovables, de tal forma que instituciones públicas o privadas,

Universidades, Consejos Provinciales, Municipios u otros interesados puedan acceder a dicha información.

La relevancia y trascendencia social es muy importante, debido a que los ingenieros, agricultores, u organismos cuenten con estos datos para diseñar proyectos de energías renovables, básicamente en potencialidades eólicas, y no requieran utilizar instrumentos de medición o estaciones meteorológicas temporales para obtener la información que necesitan.

Las aplicaciones prácticas que se podrían realizar con la utilización del proyecto son las siguientes: Acondicionamiento y ahorro de energía en edificaciones, bombeo de agua, sistemas eléctricos aislados, Comunicación, Sistemas eléctricos conectados a la red, etc. En nuestro país las energías renovables están tomando poco a poco vigencia e importancia, así que un proyecto de este tipo sería muy útil para todos.

El asesoramiento del presente proyecto, estuvo a cargo del Ingeniero Jorge Maldonado, quien goza de una gran experiencia en el manejo de software para modelación del recurso eólico, y su maestría fue orientada en este campo. Además, mediante el convenio firmado entre la Universidad de Zaragoza y la Universidad Nacional de Loja, se tiene el apoyo incondicional de los Profesores Carlos Pueyo y Enrique Telmo Martínez, quienes tienen una dilatada experiencia en el campo de la energía eólica a nivel mundial, siendo coautores incluso de un libro titulado “Energía Eólica” (ISBN: 978-84-92521-21-0)

A futuro pueden surgir ideas, recomendaciones o nuevas hipótesis que permitan aumentar el proyecto a un nivel de prestigio internacional, con bases de datos sumamente confiables en climatología, mapas eólicos, y con supercomputadoras que modelen el clima y permitan su proyección en el futuro, innovando en conceptos nuevos investigados e inclusive creando nuevos instrumentos para la medición de variables existentes en el clima.

d.- REVISIÓN DE LITERATURA

d.1. CAPÍTULO I: LA ENERGÍA EÓLICA

d.1.1. GENERALIDADES

La energía eólica hace referencia a aquellas tecnologías y aplicaciones en que se aprovecha la energía cinética del viento, convirtiéndola a energía eléctrica o mecánica.

En la actualidad, la energía eólica es utilizada principalmente para producir energía eléctrica mediante aerogeneradores.

La energía eólica es un recurso abundante, renovable, limpio y ayuda a disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero al remplazar termoeléctricas a base de combustibles fósiles, lo que la convierte en un tipo de energía verde.

El uso de toda fuente energética presenta tanto ventajas como desventajas, y la energía eólica, por supuesto, no puede escapar a esta premisa. Como principales ventajas se pueden mencionar que es inagotable, no es contaminante y es de libre acceso. En cambio las mayores desventajas son que se encuentra dispersa, es intermitente y aleatoria.

Existen regiones donde las condiciones de ocurrencia del recurso energético son tales que resultan sumamente ventajosas para su aprovechamiento. (Coordinación de Energías Renovables, 2008)

d.1.2. SITUACIÓN ACTUAL DE LA ENERGÍA EÓLICA EN EL MUNDO

En el año 2011, la capacidad instalada de energía eólica en todo el mundo llegó a los 240.000 MW.

La inversión en nuevas instalaciones tuvo un descenso en muchas partes del mundo. Por primera vez en más de dos décadas, el mercado para nuevas turbinas fue más pequeño que el año anterior, llegando a 37.642 MW, luego de 38.312 MW en 2009. China representó más de la mitad del mercado eólico en 2010. Sin tomar en cuenta a China, el mercado mundial se redujo un tercio con un decrecimiento desde 24.512 MW hasta 18.714 MW. (Asociación Mundial de Energía Eólica WWEA, 2011)

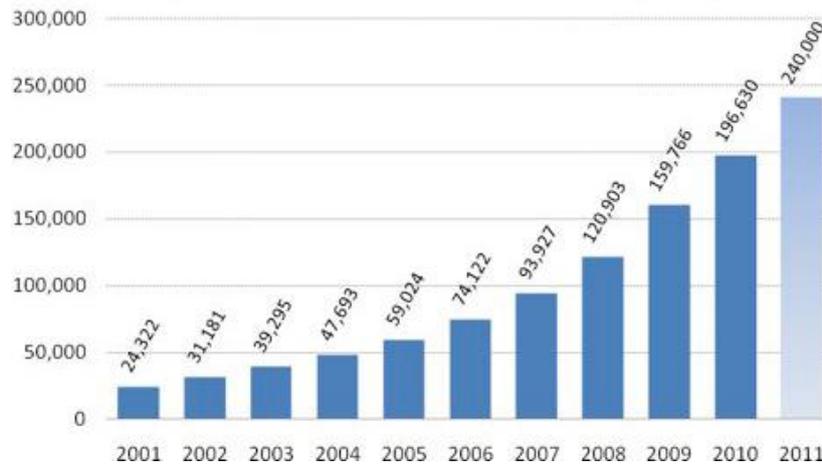


Figura 1. Capacidad Instalada a Nivel Mundial [MW]
Fuente: (Asociación Mundial de Energía Eólica WWEA, 2011)

En relación con su población, Dinamarca posee la mayor capacidad instalada per cápita (0,675 kW por persona), seguido por España (0,442 kW por persona), Portugal (0,344 kW por persona) y Alemania (0,334 kW por persona).

América Latina permaneció por debajo del crecimiento de 2009 y agregó sólo 467 MW, alcanzando una capacidad total de 1.983 MW. Su tasa de crecimiento (30,8 %) fue superior a la media en todo el mundo, sin embargo, muy por debajo del 113 % del año anterior. Todavía el continente representa sólo el 1,2% de los aerogeneradores instalados a nivel mundial. Sólo siete países de América Latina instalaron nuevos aerogeneradores en el año 2011: Brasil (320 MW), México (104,5 MW), Argentina (25,3 MW), Uruguay (10 MW), Cuba (4,5 MW), Chile (2,6 MW) y Ecuador (16 MW). Con la excepción de Brasil y México, el mercado eólico en América Latina se puede considerar en sus primeros pasos.

A pesar de la necesidad de reforzar las políticas nacionales e internacionales y de acelerar el despliegue de la energía eólica, se puede observar que el apetito por la inversión en energía eólica es fuerte y muchos proyectos están en tramitación.

Se espera un crecimiento notable sobre todo en China, India, Europa y América del Norte. Se esperan altas tasas de crecimiento en varios países de América Latina, así como nuevos mercados en Europa del este y Asia. En un mediano plazo, se proyectan grandes inversiones en algunos de los países africanos. Con base en las tasas de

crecimiento actuales, en 2015, es posible llegar a una capacidad global de 600.000 MW. A finales del año 2020, por lo menos 1'500.000 MW pueden ser instalados a nivel mundial. (Asociación Mundial de Energía Eólica WWEA, 2011)

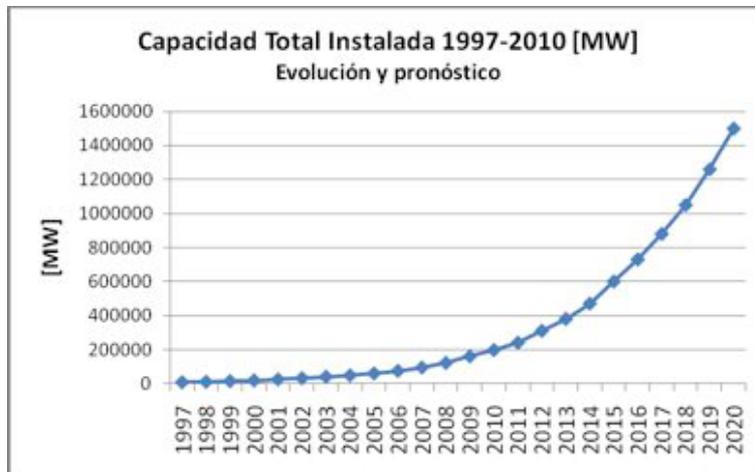


Figura 2. Evolución y pronóstico de la Capacidad Instalada a Nivel Mundial [MW]
Fuente: (Asociación Mundial de Energía Eólica WWEA, 2011)

d.1.3. EL RECURSO EÓLICO EN EL ECUADOR

El primer parque eólico del país se inauguró en octubre del 2007 en la isla San Cristóbal del Archipiélago de Galápagos, con una potencia instalada de 2,4 MW, la cual se amplió en el 2010 con un segundo parque eólico ubicado en otra de las islas del Archipiélago de Galápagos, proyecto Baltra – Santa Cruz, con una potencia instalada de 3,2 MW. Dada la relevancia medioambiental del Archipiélago de Galápagos, el MEER (Ministerio de Energía Renovable y Eficiencia Energética) se ha establecido como meta satisfacer toda la demanda eléctrica con energías renovables.

Las expectativas de potencia instalada en generación eólica para el 2015 que perfila el MEER, se encuentran entre los 40 y 50 MW. Además, en 2009 se comenzó a trabajar en desarrollar el atlas eólico de Ecuador, con la finalidad de hacerlo accesible y publicarlo en la Web del MEER. A pesar de no disponer de la herramienta de evaluación del recurso eólico, está previsto el desarrollo de proyectos eólicos en aquellas localizaciones en las cuales hay referencias históricas de vientos constantes, se han realizado estudios de factibilidad y están a la espera de financiación.

Tabla 1. Proyectos previstos de generación eólica en el Ecuador.

LUGAR	POTENCIA	ESTADO
San Cristóbal	2.4 MW	En operación
Baltra	2.25 MW	En proyecto
Salinas	15 MW	En proyecto
Huascachaca	30 MW	En proyecto
Villonaco	15 MW	En ejecución
Las Chinchas	10 MW	En proyecto
Membrillo	45 MW	En proyecto

Fuente: MEER

Las zonas localizadas geográficamente sobre la línea ecuatorial no son ricas en vientos, sin embargo en el Ecuador existen zonas de alto interés eólico por efecto de la presencia de Los Andes y de la cercanía al Océano Pacífico. (Maldonado, 2011)

Tabla 2. Localidades con potencialidades eoloenergéticas en el Ecuador

PROVINCIA	LOCALIDAD
Carchi	El Ángel
Imbabura	Salinas
Pichincha	Machachi, Malchingui, Paramo grande
Cotopaxi	Minitrac, Tigua
Bolívar	Salinas, Simiatug
Azuay	Huascachaca
Loja	El Tablón, Villonaco, Membrillo, Chinchas
Galápagos	San Cristóbal

Fuente: CONELEC (Consejo Nacional de Electricidad)

d.1.4. EL RECURSO EÓLICO EN LA PROVINCIA DE LOJA

Loja ha sido calificado por la Subsecretaria de Energía Renovable del Ministerio de Electricidad y Energías Renovables y organismos internacionales como el sitio donde existe el mayor promedio de velocidad del viento registrado sobre todo el territorio ecuatoriano factible de aprovecharse en el desarrollo de proyectos eólicos. En la actualidad existe la posibilidad de construir 880.19 MW de potencial bruto en la provincia de Loja, sobre los sitios Villonaco, Membrillo, Ventanas, Santiago y Chinchas, con un factor de planta del 50%, mejor que la mayoría de los parques eólicos del mundo, lo que asociado con las tarifas de kW/h vigentes en el país, garantiza una

Tasa Interna de Retorno muy interesante para realizar inversiones. (MEER, Políticas y estrategias para el cambio de la matriz energética del Ecuador, 2009)

El desarrollo de la energía eólica en la ciudad y provincia de Loja en los últimos años, ha sido gracias al aporte científico y económico que instituciones de educación superior como la Universidad Nacional de Loja e instituciones gubernamentales como el Gobierno Provincial de Loja han brindado. En este sentido se puede citar el proyecto eólico “Villonaco” que se programó en dos fases: FASE I: Factibilidad y diseño básico. FASE II: Implementación y Desarrollo. La FASE I de factibilidad y diseño definitivo involucró la colocación de seis torres de medición de viento con sus respectivos sensores para su correspondiente monitorización, en puntos potenciales ubicados en la frontera provincia de Loja. La supervisión de los estudios estuvo a cargo del Ministerio de Energía y Minas del Ecuador, actualmente Ministerio de Electricidad y Energías Renovables. (Maldonado, 2011)

El área del proyecto se encuentra en la Provincia de Loja, y comprende un área que políticamente pertenece a los cantones de Loja y Catamayo.



Figura 3. Fotografía del Parque Eólico Villonaco
Fuente: www.gobiernodeloja.gob.ec

El Parque Eólico Villonaco tendrá una potencia nominal de 16.5 MW y se construyó en el sector del Villonaco, a 15 km de la ciudad de Loja, La zona se encuentra a 2700 m.s.n.m (metros sobre el nivel del mar), presenta precipitaciones escasas, las temperaturas promedio oscilan entre 12°C y 15°C, y la velocidad promedio del viento es de 12.7 m/s (anual).

d.2. CAPÍTULO II: EL RECURSO EÓLICO

d.2.1. NATURALEZA DEL VIENTO

La energía eólica se deriva de la energía del sol. La Tierra recibe $1,74 \times 10^{14}$ kW de potencia del sol. Alrededor de un 1% a un 2% de esta energía es convertida en energía eólica. Los vientos tienen distinto origen o naturaleza según la escala geográfica en la que varían:

A escala global, en el orden de los 10.000 km.

A macroescala, en el orden de los 1.000 km.

A mesoescala, en el orden de los 100 km.

A microescala, en el orden de los 10 km.

Las regiones alrededor del ecuador, a 0° de latitud, son calentadas por el sol más que las zonas del resto del globo. Estas áreas calientes están indicadas en colores cálidos, rojo, naranja y amarillo, en esta imagen de rayos infrarrojos <tomada de un satélite de la NASA (National Aeronautics and Space Administration), el NOAA-7 (National Oceanic and Atmospheric Administration)>, el aire caliente es más ligero que el aire frío, por lo que subirá hasta alcanzar una altura aproximada de 10 km, extendiéndose hacia el norte y hacia el sur.

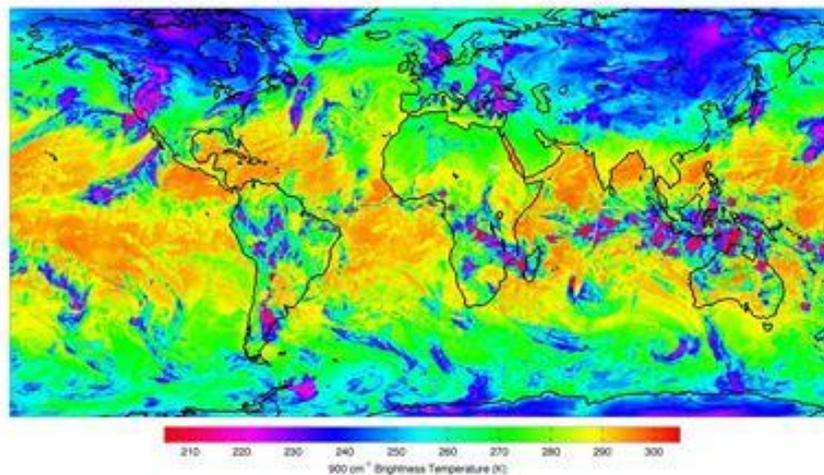


Figura 4. Fotografía de la Superficie de la Tierra en Infrarrojo.
Fuente: Sensor AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer)

Debido a la rotación del globo, el viento sube desde el ecuador y se desplaza hacia el norte y hacia el sur en las capas más altas de la atmósfera. Alrededor de los 30° de latitud en ambos hemisferios, el efecto de **Coriolis**¹, evita que el viento se desplace más allá. En esa latitud se encuentra un área de altas presiones, por lo que el aire empieza a descender de nuevo. Cuando el viento suba desde el ecuador habrá un área de bajas presiones cerca del nivel del suelo atrayendo los vientos del norte y del sur. En los polos, habrá altas presiones debido al aire frío. Teniendo en mente la fuerza de curvatura de la fuerza de Coriolis, obtenemos los siguientes resultados generales de las direcciones del viento dominantes a escala global y a macroescala.

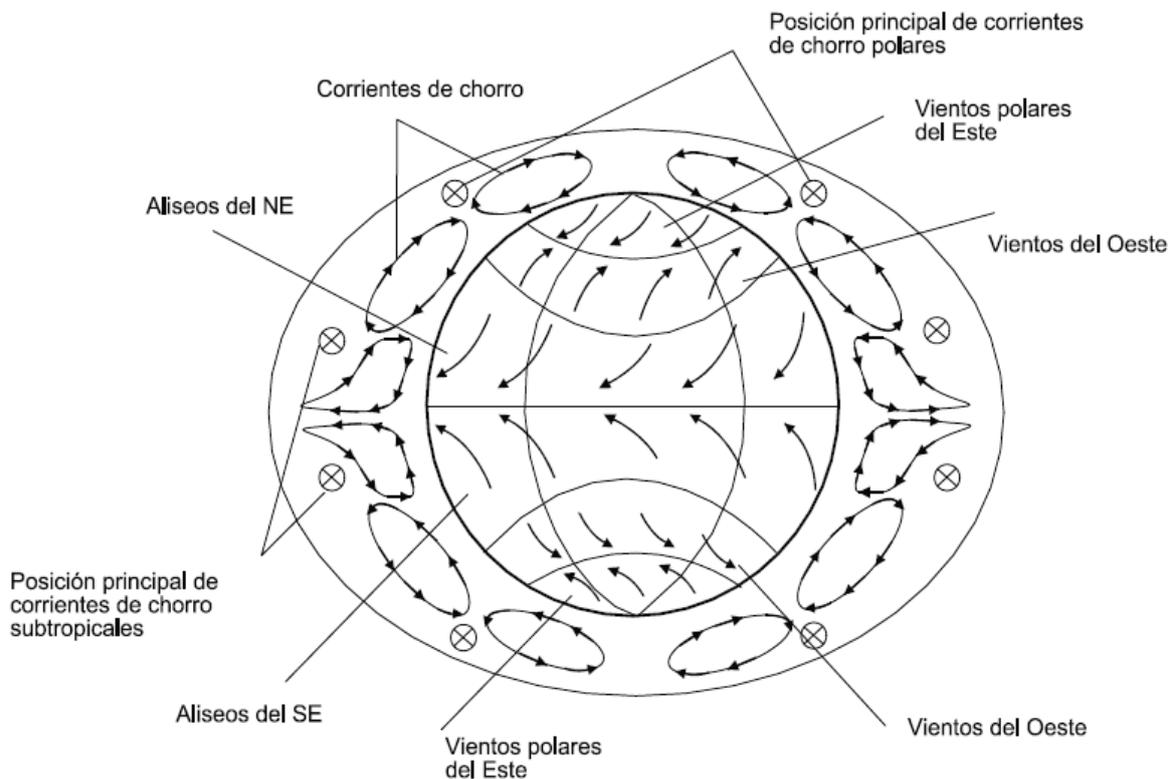


Figura 5: Dirección predominante de los vientos en el planeta.

Fuente: *Curso de Física Ambiental (UCLM, Grupo G-9)*

¹ El **efecto Coriolis**, descrito en 1836 por el científico francés Gaspard-Gustave Coriolis, es el efecto que se observa en un sistema de referencia en rotación (y por tanto no inercial) cuando un cuerpo se encuentra en movimiento respecto de dicho sistema de referencia.

d.2.2. VIENTOS EN ECUADOR

Los vientos predominantes en el Ecuador son los alisios del Noreste en el Hemisferio Norte y los del Sureste en el Hemisferio Sur, alterándose esta prevalencia por el comportamiento de las masas de aire y los desplazamientos del cinturón ecuatorial. (Figura 5).

“Podemos considerar cuatro zonas de origen de masas de aire en el Ecuador:

- Masas Tropicales Marítimas: Estas masas se originan en las extensiones oceánicas y se distinguen por su alta temperatura y gran contenido de humedad.
- Masas Tropicales Continentales: Estas masas se caracterizan por bajas temperaturas y un contenido menor de humedad, su lugar de origen son las planicies del Litoral y del Oriente, distinguiéndose estas últimas por un mayor contenido de humedad.
- Masas Templadas: Estas masas se caracterizan por bajas temperaturas y un contenido muy irregular de humedad, se sitúan en los valles interandinos.
- Masas de Aire Frías: Estas masas se asientan en las mesetas andinas y en las cimas altas de las montañas (más de 3000 m de altura); las temperaturas son menores o iguales a 0 °C y la humedad depende de la influencia de las masas de aire que recibe.” (Maldonado, 2011)

d.2.3. VELOCIDAD DEL VIENTO

Desde el punto de vista de la energía eólica, la característica más importante del viento es su variabilidad, tanto desde el punto de vista geográfico como temporal. A gran escala, la variabilidad espacial describe el hecho de que en el mundo existen diferentes zonas climáticas, algunas con mayor disponibilidad de recursos que otras, determinadas fundamentalmente por su latitud.

Dentro de una región específica, existen variaciones en menor escala, dictadas fundamentalmente por las condiciones geográficas (cercanía al mar, extensión del terreno, presencia de montañas, etc.). El tipo de vegetación también es un factor

determinante. Las características topográficas, sin duda, afectan la cantidad de viento en una escala más local.

Para una zona determinada, la variación temporal de largo plazo significa que la intensidad de viento puede variar en una escala de años o décadas.

En escalas de tiempo menores que un año, las variaciones estacionales son mucho más predecibles; y dependiendo de la localidad, es posible encontrar variaciones considerables, incluso, a lo largo del día.

En la Figura 6, se muestra un ejemplo de la variabilidad estacional a lo largo del año, y diaria del viento de los datos registrados en una estación meteorológica.

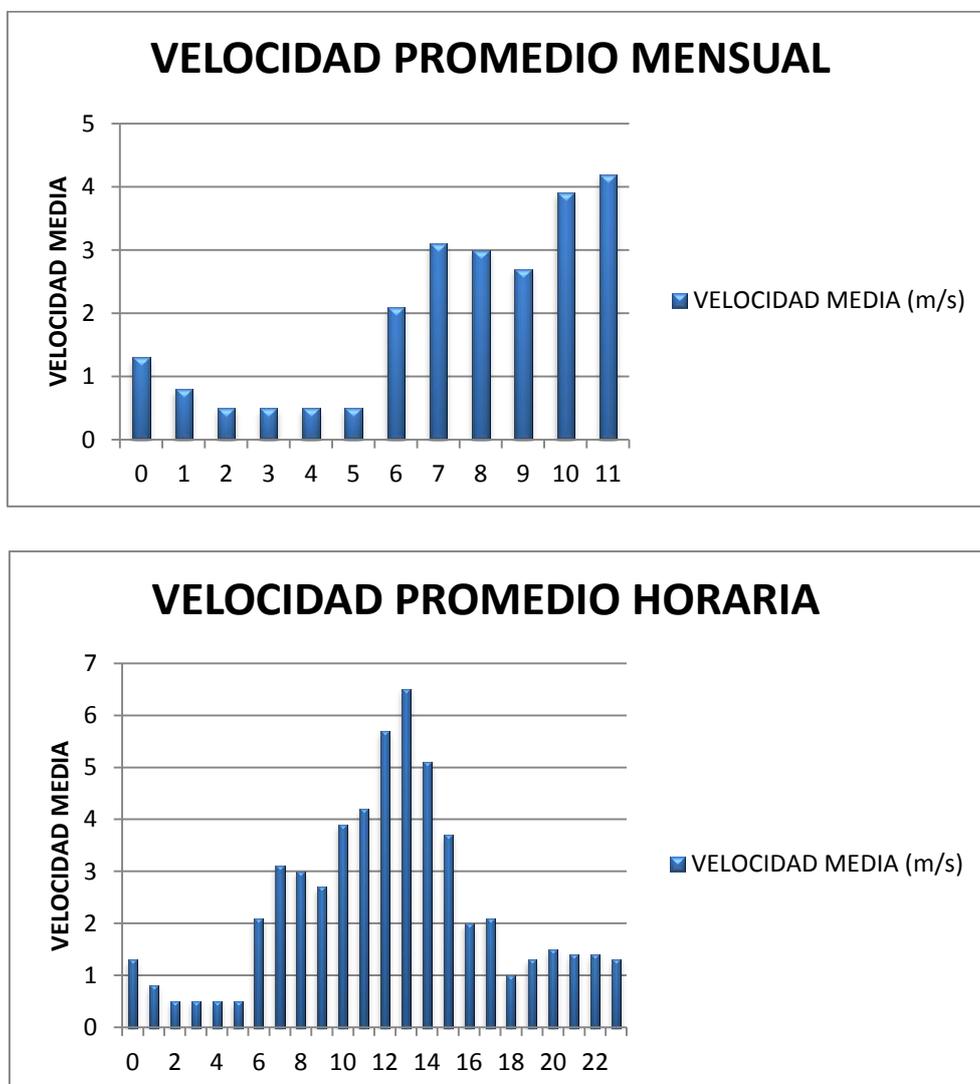


Figura 6. Datos de la estación meteorológica automática “Changaimina” de la Provincia de Loja.
Fuente: Autor

Lo indicado anteriormente implica que será de vital importancia la caracterización detallada del recurso eólico, para lo cual existen una serie de instrumentos prácticos y teóricos. Generalmente se debe realizar un estudio de explotación del recurso eólico, el que involucra la instalación de una o más torres de medición, dependiendo del tamaño del proyecto. Cada torre debe tener una altura mínima de 40 metros, con sensores ubicados en diferentes niveles; tres idealmente. Todo esto es en forma ideal, de ahí la importancia de conocer con anterioridad la potencialidad de algún sector específico, para ello, este trabajo de investigación de tesis dará una visión aproximada de los posibles sitios en la provincia de Loja que cuenten o no con potencial eólico.

Tabla 3. Escala de velocidad del viento

ESCALA DE VELOCIDAD DEL VIENTO		
VELOCIDAD DEL VIENTO (m/s)	Escala Beaufort ²	Viento
0,0 – 0,4	0	Calma
0,4 – 1,8	1	Ligero
1,8 – 3,6	2	
3,6 – 5,8	3	
5,8 – 8,5	4	Moderado
8,5 – 11	5	Fresco
11 – 14	6	Fuerte
14 – 17	7	
17 – 21	8	Temporal
21 – 25	9	
25 – 29	10	Fuerte Temporal
29 – 34	11	
>34	12	Huracán

Fuente: http://es.wikipedia.org/wiki/Escala_de_Beaufort

² La Escala de Beaufort es una medida empírica para la intensidad del [viento](#), basada principalmente en el estado del mar, de sus olas y la fuerza del viento. Su nombre completo es Escala de Beaufort de la Fuerza de los Vientos.

La duración del estudio corresponde generalmente a un año por lo menos. El resultado del estudio es esencialmente una serie de datos de los cuales es posible determinar la distribución de probabilidad de la intensidad de viento, es decir, la probabilidad de obtener una intensidad de viento determinada durante el año. Generalmente, se obtiene que la intensidad de viento se distribuya de modo similar a una distribución de probabilidad de Weibull, y para la frecuencia de variación de las direcciones, se utiliza una rosa de velocidades.

d.2.3.1. DISTRIBUCIÓN DE WEIBULL

La expresión analítica que ha sido más empleada para representar las probabilidades de ocurrencia de una velocidad del viento o sea la frecuencia de aparición de cada velocidad del viento es la distribución de WEIBULL³, cuya fórmula general es:

$$p(v) = \left(\frac{k}{c}\right) * \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} * \exp\left(-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right) \quad \text{ecuación 1}$$

Donde:

$p(v)$ es la probabilidad estadística, adimensional, de que ocurra la velocidad v ;

k es el factor de forma, adimensional;

c es el factor de escala, en m/s.

Una gráfica común que se obtiene de la distribución de Weibull es la que se muestra en la figura 8:

³ En teoría de la probabilidad y estadística, la distribución de Weibull es una distribución de probabilidad continua. Recibe su nombre de Waloddi Weibull, que la describió detalladamente en 1951.

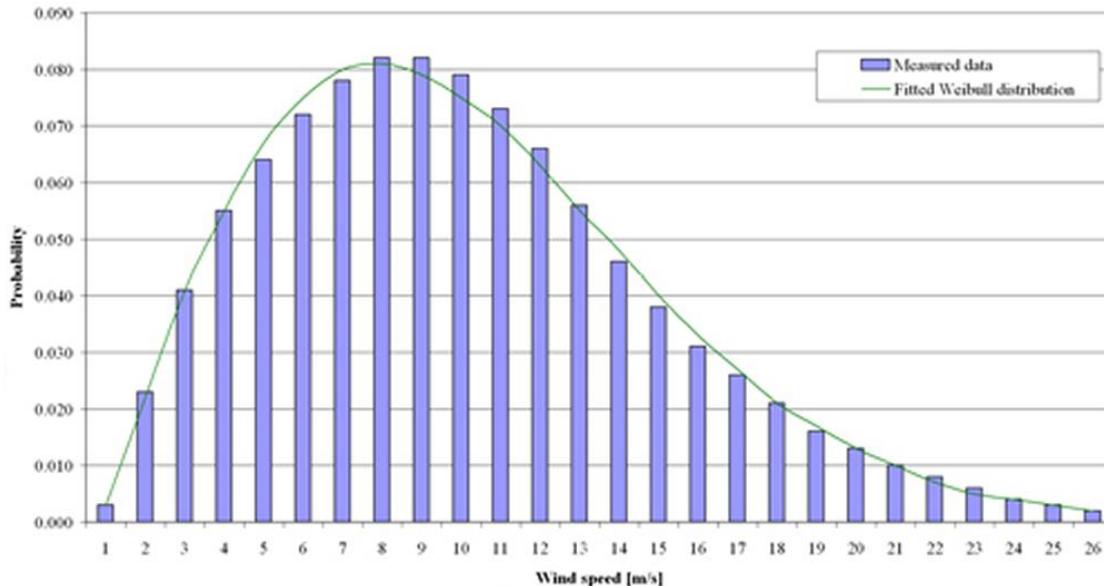


Figura 7: Ejemplo de una Distribución de Weibull para velocidades de viento.
Fuente: Garrad Hassan <http://www.gl-garradhassan.com>

La distribución de Weibull proporciona un método empírico preciso para la representación de la distribución de frecuencias de velocidades del viento. Como se ha podido observar, para el establecimiento de la expresión de la distribución de Weibull en el sitio analizado son necesarios los parámetros k y c . Durante la determinación del potencial eólico en el emplazamiento seleccionado, los valores de estos parámetros se obtienen para una altura de medición del viento determinada. Para las estaciones meteorológicas, la altura estándar es de 10m.

En el momento de evaluar el potencial eólico en un sitio de emplazamiento puede no resultar posible medir la velocidad del viento a la altura del buje de los aerogeneradores que se pretende instalar. En este caso, la solución consiste en extrapolar las mediciones realizadas en la estación de referencia a la altura de la torre del aerogenerador.

La extrapolación vertical comprende la variación de la velocidad del viento debida fundamentalmente a que los obstáculos del suelo perturban el flujo del aire cerca del mismo. El rozamiento de la corriente de aire con la superficie terrestre genera un perfil vertical de velocidad del viento donde esta última es en general creciente con la altura, y este crecimiento puede ser bien intenso cuando se trata de terrenos rugosos. Este efecto es tan importante que los datos de viento deben incluir obligatoriamente la altura a que

fueron medidos. Si ésta no se menciona explícitamente, por lo general puede cautelosamente suponerse igual a 10 metros sobre el nivel del suelo.

La manera más fácil de calcular el incremento de la velocidad del viento con la altura es el método de la *ley exponencial*. La fórmula de la ley exponencial para realizar la extrapolación de la velocidad es la siguiente:

$$v = v_o \left(\frac{h}{h_o} \right)^\alpha \quad \text{ecuación 2}$$

Donde:

h_o es la altura del anemómetro con respecto al suelo en la estación de referencia;

v_o es la velocidad del viento en la estación de referencia, a la altura h_o ;

α es el coeficiente de rugosidad superficial en el sitio de emplazamiento;

h es la altura del buje del aerogenerador;

v es la velocidad del viento en el sitio de emplazamiento, a la altura h .

El valor del exponente α en la ecuación 2, se puede obtener por la expresión empírica

$$\alpha = \frac{0.37 - 0.088 \cdot \ln v_o}{1 - 0.088 \cdot \ln \left(\frac{h_o}{10} \right)} \quad \text{ecuación 3}$$

Donde h_o y v_o se dan en m y m/s, respectivamente.

La determinación de los parámetros de Weibull, k y c , se realiza de la manera siguiente:

Para determinar el valor de k se utiliza la fórmula

$$k = \frac{1 - 0.088 \cdot \ln \left(\frac{h_o}{10} \right)}{1 - 0.088 \cdot \ln \left(\frac{h}{10} \right)} * k_o \quad \text{ecuación 4}$$

Donde:

k_o es el factor de forma en la estación de referencia, a la altura h_o , dada en m;

k es el factor de forma en el sitio de emplazamiento a la altura h , dada en m.

En el caso de c , dado que tiene dimensiones de velocidad, se estima su variación vertical con una fórmula derivada de la ecuación 2, sustituyendo en ésta última v por c .

Con ello se llega a la ecuación:

$$c = c_o \left(\frac{h}{h_o} \right)^\beta \quad \text{ecuación 5}$$

Donde:

c_o es el factor de escala en la estación de referencia a la altura h_o , dada en m;
 c es el factor de escala en el sitio de emplazamiento, a la altura h , dada en m.

El valor del exponente β en la ecuación 5 se puede obtener por la expresión empírica

$$\beta = \frac{0.37 - 0.088 * \ln c_o}{1 - 0.088 * \ln \left(\frac{h_o}{10} \right)} \quad \text{ecuación 6}$$

“Esencialmente, este proceso consiste en relacionar la función de distribución de las probabilidades de Weibull para la velocidad del viento en el sitio analizado y a la altura del buje de la máquina, en función de las horas o de la frecuencia de ocurrencia de cada velocidad, con la curva característica de operación de la turbina suministrada por el fabricante, donde se da la potencia que entrega el aerogenerador en función de la velocidad del viento.” (Grupo de Trabajo para el Impulso de la Energía Eólica, 2006)

d.2.4. DIRECCIÓN DEL VIENTO

Las características direccionales del viento son de gran importancia, especialmente para la ubicación de aerogeneradores. Éstas se manifiestan fundamentalmente a través de dos representaciones, la rosa de frecuencias y la rosa de velocidades.

Es importante definir los siguientes conceptos:

Sector: Es una porción del conjunto de 360° de direcciones posibles. Se establecen 12 sectores de 30° o bien 16 sectores de 22.5° cada uno.

Rosa: Es una representación gráfica en forma circular donde se representa por sectores de una determinada variable, ya sea frecuencia, velocidad, energía, perfil vertical, intensidad de turbulencia, etc.

Los sectores se empiezan a numerar comenzando por el correspondiente a 0° (dirección norte). Pueden estar centrados (si 0° indica el valor central del sector 1) o no centrados (si 0° indica el valor inicial del sector 1).

Tabla 4. Rango de ángulos de una distribución de 12 sectores

Número de sector	12 sectores centrados	12 sectores no centrados
1	[346°,15°]	[0°,29°]
2	[16°,45°]	[30°,59°]
3	[46°,75°]	[60°,89°]
4	[76°,105°]	[90°,119°]
5	[106°,135°]	[120°,149°]
6	[136°,165°]	[150°,179°]
7	[166°,195°]	[180°,209°]
8	[196°,225°]	[210°,239°]
9	[226°,255°]	[240°,269°]
10	[256°,285°]	[270°,299°]
11	[286°,315°]	[300°,329°]
12	[316°,345°]	[330°,359°]

Fuente: (Talayero Navales, y otros, 2008)

d.2.4.1. ROSA DE FRECUENCIAS

Esta gráfica representa la frecuencia de aparición de cada sector. Es decir, representa el porcentaje de tiempo en el que el viento proviene de un determinado sector.

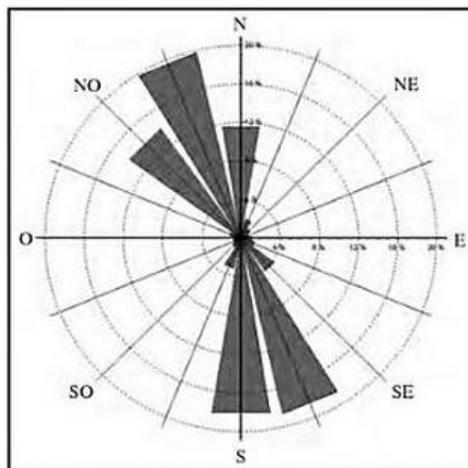


Figura 8. Rosa de frecuencias

Fuente: (Talayero Navales, y otros, 2008)

d.2.4.2. ROSA DE VELOCIDADES.

Representa para cada sector la velocidad promedio de todas las velocidades pertenecientes al mismo.

En la figura 10, se puede ver cómo el sector con mayor velocidad media es el sector S, con 10 m/s.

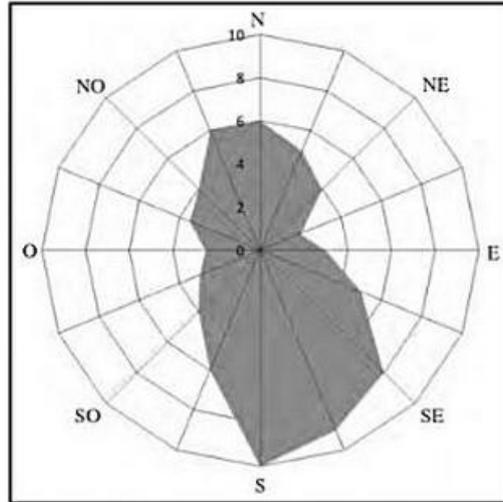


Figura 9. Rosa de velocidades
Fuente: (Talayero Navales, y otros, 2008)

Los sectores con mayor frecuencia no siempre tienen la mayor velocidad media. En este ejemplo de las figuras 9 y 10, el sector con mayor frecuencia es el NNO con una frecuencia de aparición de un 20%, y el sector S es al que le corresponde la mayor velocidad, 10 m/s.

d.2.4.3. ROSA DE ENERGÍA

Es una mezcla de las dos rosas anteriores, ya que depende de la velocidad media de dicho sector y del tiempo que se da esa velocidad media. En el caso de este ejemplo, la rosa de energía, representada como el porcentaje de energía por sectores, es la siguiente:

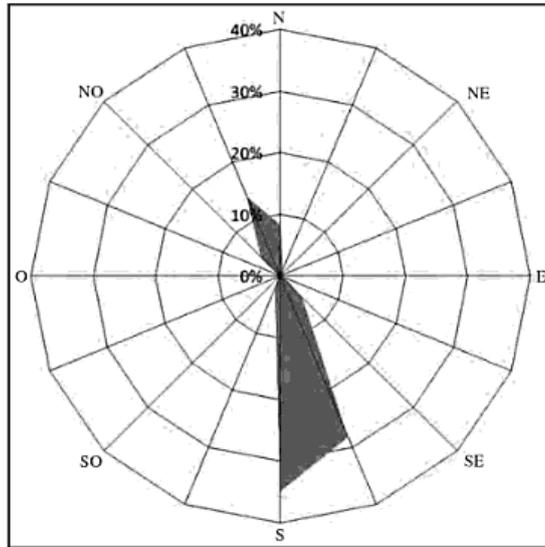


Figura 10. Rosa de energía
Fuente: (Talayero Navales, y otros, 2008)

Para estimar la rosa de energía anual promedio del emplazamiento, se ha estimado, en primer lugar, el número de horas en cada uno de los sectores. Para ellos, multiplicaremos la frecuencia por el número de horas/año, obteniendo, de esta forma, el número de horas por cada sector. Posteriormente, se estima la “energía por sector” como el número de horas año en dicho sector por el cuadrado de la velocidad, y se relativiza en cada sector respecto del total.” (Talayero Navales, y otros, 2008)

d.3 CAPÍTULO III: MEDICIÓN DEL VIENTO

Para la realización del proyecto de investigación co-financiado por la SENESCYT “Desarrollo de modelos espacio temporales de variables solares y eólicas para estimar el potencial energético en la Región Sur del Ecuador”, y consecuentemente para el presente proyecto de tesis de postgrado, se cuenta con el apoyo del INAMHI, con una carta de auspicio y apoyo, en donde se compromete a entregar toda la información de las estaciones meteorológicas de la Región Sur del Ecuador, específicamente con los datos de radiación solar y velocidad del viento.

d.3.1. ESTACIONES METEOROLÓGICAS DEL INAMHI

Una **estación meteorológica** es una instalación destinada a medir y registrar regularmente diversas variables meteorológicas. Estos datos se utilizan tanto para la elaboración de predicciones meteorológicas a partir de modelos numéricos como para estudios climáticos.

En el Ecuador “la instalación de las estaciones, la recolección de los datos meteorológicos, la comunicación de los mismos, la digitación, procesamiento, validación y exposición al servicio del usuario, requiere de parte del estado una significativa inversión y, de los técnicos del INAMHI el conocimiento solvente que satisfagan los requerimientos técnicos, con el cumplimiento de normas internacionales.” (INAMHI, 2006)

Las estaciones meteorológicas del INAMHI, se clasifican en varios tipos según los objetivos y los parámetros que se desee medir, entre las principales podemos citar las siguientes:

- Climatológicas
- Agrometeorológicas
- Sinópticas (de superficie y en altitud)
- Aeronáuticas
- Especiales

d.3.1.1. INFORMACIÓN BASE

Los datos de velocidad y dirección del viento fuente de estudio, se obtuvieron de tres fuentes de información, según la siguiente tabla:

Tabla 5. Fuentes de información eólica utilizadas en el proyecto 754

MAGNITUD	MEDIO	ORIGEN	LUGARES	RESOLUCIÓN TEMPORAL	Tipo de Estación Meteorológica
Velocidad promedio mensual y Dirección del viento	ANUARIOS en PDF	INAMHI – Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología http://www.inamhi.gov.ec/	Todo Ecuador	2000-2009, promedios mensuales	Convencional
Velocidad promedio mensual y Dirección del viento	1 archivo de compilación en EXCEL	INAHMI (envío personalizado)	Todo Ecuador 25 estaciones de la región Sur	1980 – 210 promedios mensuales	Convencional
Velocidad promedio, velocidad máxima, velocidad mínima, racha y dirección del viento.(datos horarios)	1 archivo de compilación en EXCEL	Empresa que instaló las estaciones: Sistemas Tecnológicos, supervisión INAMHI.	10 estaciones en la Provincia de Loja	28 de diciembre de 2009 – 31 de enero de 2011. (promedios horarios)	Automática

Fuente: Autor

d.3.2. ESTACIONES METEOROLÓGICAS CONVENCIONALES

Se denominan “convencionales” a las estaciones meteorológicas en las cuales, las observaciones de los parámetros y magnitudes de medición son realizadas por un observador capacitado.

En las estaciones agrometeorológicas o de referencia, se realizan observaciones horarias entre las 07h00 y 19h00. En las climatológicas principales, las observaciones son bihorarias y, en las ordinarias se registran tres observaciones diarias (07, 13 y 19 horas). En las estaciones pluviométricas pueden realizarse tres tipos de registros: tres observaciones diarias (07, 13 y 19 horas), dos observaciones (07 y 19 horas) o una observación (07 horas).” (INAMHI, 2006)

Estas estaciones, se refieren exclusivamente a la toma de los datos a través de mediciones, observaciones o registros realizados por el Observador u Operador de la estación a las horas señaladas, en formularios diseñados para el efecto.

Adicionalmente a la toma de datos por el Observador, también existen los registros gráficos, los cuales registran la evolución de un fenómeno meteorológico en el tiempo, de una manera continua. Estos son de diversa índole, pudiendo ser diarios, semanales, mensuales o para un período específico, dependiendo del instrumento registrador.

d.3.2.1. INSTRUMENTACIÓN

a) Anemocinemógrafo

Aparato registrador en un gráfico de la variación cronológica de la dirección, fuerza y recorrido del aire.

b) Veleta aspa de Wild

Instrumento de observación directa del viento, en el cual el viento actúa sobre una placa liviana suspendida sobre el eje horizontal, cuya inclinación con la vertical esta en función de la velocidad del viento y que por medio de una veleta posiciona el aparato con referencia de donde sopla el viento marcando su dirección.

c) Anemómetro totalizador

Anemómetro de cazoletas o molinete donde la rotación se transmite a un contador mecánico indicando directamente el movimiento del aire que pasa por el anemómetro, o sea mide el recorrido del aire del cual se calcula la velocidad media del aire en Km/h. Todos estos aparatos se encuentran instalados a diez metros de altura.

El “observador” diariamente registra, en forma manual, los datos marcados por los sensores. En el caso de los datos correspondientes a velocidad y dirección del viento, al realizarse tres observaciones diarias en un instante determinado, no se podrá garantizar con confiabilidad una caracterización del recurso eólico en este sector.



Figura 11. Estación Meteorológica convencional “La Argelia” – Loja.
Fuente: Autor

CODIGO	ANIO	ENE	DO1	FEB	DO2	MAR	DO3	ABR	DO4	MAY	DO5	JUN	DO6	JUL	DO7	AGO	DO8	SEP	DO9	OCT	D10	NOV	D11	DIC	D12			
M001	1982	3.8 S	4.8 E	3.6 S	3.3 NE	3.3 NE	5.5 E	5.8 E	5.9 E	6.1 E	4 NE	4.3 E	3.9 E	M001	1983	4 E	5.3 E	4.3 E	3.4 NE	2.9 NE	4.1 NE	6.2 NE	6.8 NE	9.8 NE	6 NE	7.4 NE	8 NE	
M001	1984	5.1 E	5.1 E	4.9 E	4 E	3.4 E	4.2 E	4.1 E	5.7 E	3.8 E	3.7 E	4.8 E	5 E	M001	1985	2.3 E	5.9 E	4.6 E	5 E	4.2 E	4.7 E	5 E	5.3 E	3.8 E	3.2 E	3.9 E		
M001	1986	4.4 E	2.5 E	4.3 E	4.3 E	4.1 E	4.3 E	6.9 E	7.4 E	6.3 E	6.1 E	5.8 E	6.1 E	M001	1987	6.9 E	6 E	5.4 E	6.9 E	5.9 E	6.7 E	7.3 E	6.4 E	5.9 E	5.1 E	6 E	7.2 NE	
M001	1988	5 E	5.3 NE	5.1 NE	3.1 NE	4.5 NE	6.1 NE	5.7 NE	5.3 NE	4 E	4.8 NE	3.3 NE	4.9 NE	M001	1989	5.4 NE	6.1 NE	4.2 NE	6.6 NE	6.1 NE	6.5 NE	8.9 NE	7.2 NE	6 NE	5.1 NE	6.5 NE	5.4 NE	
M001	1990	6.9 NE	5 NE	7.4 NE	5.4 NE	6.5 NE	6.7 NE	4.4 E	7.4 NE	4.9 E	4.4 E	6.9 NE	5 E	M001	1991	4.4 E	5.4 E	4 E	5.1 E	4.2 E	4.9 E	5.7 E	6.5 E	5.6 E	5.1 E	3.7 E	5.1 E	
M001	1992	5.7 E	4.9 E	6.5 E	5.6 E	5.6 E	5.6 E	7.1 NE	7.2 NE	6.5 E	7.2 E	7.2 E	5.6 E	M001	1993	5.9 E	5.9 E	5.4 E	5.9 E	5.9 E	7.2 E	7.3 E	7.5 E	5.1 E	5.2 E	5.5 E	3.7 NW	
M001	1994	5.2 E		4.2 E	5.4 E	5.1 E	8.1 NE	11 NE	6.6 E	11 E	6.7 E	6.9 E	7.4 E	M001	1995	7.6 E	5.9 E	6.5 E	5.5 E	5.8 E	5.5 E	6.4 E	5.5 E	6.7 E	5.1 E	5.2 E	4.7 E	
M001	1996	4.9 E	4.8 E	4.8 E	5.1 E	4.8 E	5.1 E	4.8 E	5.7 E	6.2 E	5.9 E	5.6 NE	6.1 E	5.8 E	M001	1997	3.3 NE	5.5 E	5 E	5.6 E	5.8 NE	5.9 NE	7.3 E	9.2 E	6.9 SE	6.2 E	4.2 E	4.1 E
M001	1998	4.7 E	5.7 E	4.6 E	4.1 NE	4.4 E	4.8 E	3.8 E	6.1 NE	5.3 NE	5.8 NE	4.5 NE	5 NE															

Figura 12. Captura de pantalla de archivo de compilación en Excel, de las estaciones meteorológicas convencionales de todo el Ecuador.
Fuente: INAMHI



Figura 13. Ubicación de las estaciones meteorológicas convencionales del INAMHI en la RSE.

Fuente: *Autor*

d.3.3. ESTACIONES METEOROLÓGICAS AUTOMÁTICAS

La Organización Mundial Meteorológica define a las estaciones automáticas como “las estaciones en las cuales las observaciones son realizadas y transmitidas automáticamente”. Todos los sensores de las diferentes magnitudes se conectan a un equipo electrónico “datalogger”, el cual, registra, almacena y transmite la información a un servidor, o a su vez, esta información es descargada manualmente en un dispositivo de almacenamiento masivo.



Figura 14. Fotografía de una estación meteorológica automática instalada en la provincia de Loja.

Fuete: *Empresa Sistemas Tecnológicos Alcatecni Cia. Ltda..*

Dentro de este proyecto, se han considerado los datos de 10 estaciones meteorológicas automáticas, compradas por la Ex “Subcomisión Ecuatoriana PREDESUR” en diversos sectores de la provincia de Loja, según el siguiente detalle:

Tabla 6. Asignación y ubicación de 10 estaciones meteorológicas automáticas

N°	SECTOR	CÓDIGO	LATITUD	LONGITUD
1	ZAPOTILLO	M0151	4°18'13.26" S	80°13'56.88" W
2	EL ALMENDRAL	M1242	4°2'38.4" S	79°47'42.3" W
3	VILCABAMBA	M0144	4°15'40.4" S	79°13'7.02" W
4	YANGANA	M0147	4°22'3.9" S	79°10'31.44" W
5	AMALUZA	M0150	4°35'4.86" S	79°25'49.26" W
6	EL INGENIO	M1128	4°24'52.26" S	79°25'54.48" W
7	QUILANGA	M0241	4°17'36.24" S	79°24'9.84" W
8	CARIAMANGA	M0146	4°19'59.76" S	79°33'15.12" W
9	CHANGAIMINA	M0756	4°13'6.06" S	79°31'24.6" W
10	CHUQUIRIBAMBA	M1247	3°50'39.6" S	79°20'30.12" W

Fuete: Empresa Sistemas Tecnológicos Alcatecni Cia. Ltda..



Figura 15. Ubicación espacial de las 10 estaciones meteorológicas automáticas

Fuete: Empresa Sistemas Tecnológicos Alcatecni Cia. Ltda..

Los datos obtenidos están en formato Excel, como ejemplo se muestra una captura de pantalla de los datos del viento de una de las estaciones.

del 28 dic 2009 al 31 enero de 2011.xlsx - Microsoft Excel

Archivo Inicio Insertar Diseño de página Fórmulas Datos Revisar Vista Programador

Calibri 11 Fuente Alineación Número Estilos

N13

VILCABAMBA
95001

Fecha: 02/02/2011 Hora: 04:06

FECHA	HORA	SUMA DE RADIACION SOLAR	VELOCIDAD MAXIMA DEL VIENTO	VELOCIDAD MINIMA DEL VIENTO	VELOCIDAD PROMEDIO DEL VIENTO	RECORRIDO DEL VIENTO	DIRECCION VIENTO PROMEDIO	DIRECCION DE LA RACHA	HORA DE LA RACHA	MINUTO DE LA RACHA
28/12/2009	8:00	12975	1.1	0	0	0	337	343	7	57
28/12/2009	9:00	32712	2.3	0	0.1	2	274	250	8	58
28/12/2009	10:00	44078	3	0	0.3	5	243	253	9	51
28/12/2009	11:00	56009	3.5	0	0.3	6	240	234	10	34
28/12/2009	12:00	61711	3.5	0	0.4	7	219	227	11	31
28/12/2009	13:00	62762	3.3	0	0.6	10	230	237	12	44
28/12/2009	14:00	59202	3.7	0	0.5	11	238	196	13	25
28/12/2009	15:00	50848	6.5	0	1.3	21	222	238	14	57
28/12/2009	16:00	14511	7.6	0	2.4	38	227	249	15	58
28/12/2009	17:00	7682	8.1	0	2.7	43	226	241	16	36
28/12/2009	18:00	5131	7.4	0	2.6	41	229	247	17	14

Figura 16. Captura de pantalla de documento Excel, con los datos horarios de velocidad del viento de la estación “Vilcambamba” de la Provincia de Loja.

Fuente: INAMHI

d.3.3.1. INSTRUMENTACIÓN

a) Anemómetro

El **anemómetro** es un aparato meteorológico que se usa para la predicción del tiempo y, específicamente, para medir la velocidad del viento.

Las características técnicas del anemómetro utilizado en las estaciones automáticas son las siguientes:

- Rango: 0 – 30 m/s
- Resolución: no mayor a 0.5 m/s
- Modo de medición: promedio
- Precisión Mínimo: $\pm 0,3$ m/s o $\pm 3\%$ de la lectura, para lecturas de 0 hasta 30 m/s;
- La altura de medición estándar del viento será a 10.

b) Veleta

Una **veleta** es un dispositivo giratorio que consta de una placa que gira libremente, un señalador que indica la dirección del viento y una cruz horizontal que indica los puntos cardinales.

Las características técnicas de la veleta utilizada en las estaciones automáticas son las siguientes:

- Rango de medición de 0 a 360°
- Resolución 1° o menor
- Exactitud +/- 3°

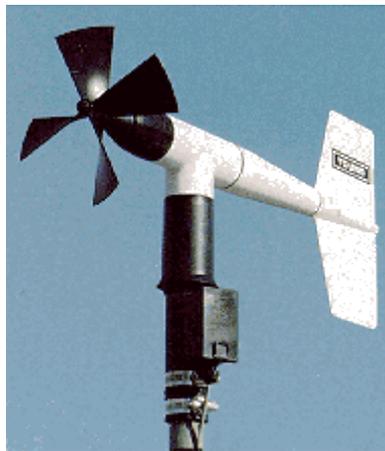


Figura 17. Anemoveleta instalada en las estaciones automáticas de la provincia de Loja.
Fuete: *Empresa Sistemas Tecnológicos Alcatecni Cia. Ltda..*

d.3.4. TRATAMIENTO DE LA INFORMACIÓN

Se ha tomado los códigos de 95001 hasta 95010, para identificar a las estaciones automáticas correspondientes a la nomenclatura utilizada en la Tabla 6.

Tabla 7. Incidencias de los datos de las estaciones automáticas.

Estación	Periodo de medida				INCIDENCIAS	ACCIÓN CORRECTIVA
95001	28/12/2009	8:00:00	31/01/2011	23:00:00	Sin incidencias	--
	20/12/2010		22/12/2010		Baja disponibilidad de datos. También a lo largo del periodo de medida	--
95002	02/01/2010	6:00:00	02/01/2010	6:00:00	Dato repetido	Eliminación del registro
	20/12/2010		22/12/2010		Baja disponibilidad de datos. También a lo largo del periodo de medida	--
95003	02/01/2010	6:00:00	02/01/2010	6:00:00	Dato repetido	Eliminación del registro
	20/12/2010		22/12/2010		Baja disponibilidad de datos. También a lo largo del periodo de medida	--
95004	28/12/2009	8:00:00	31/01/2011	23:00:00	Sin incidencias	--
	20/12/2010		22/12/2010		Baja disponibilidad de datos. También a lo largo del periodo de medida	--
	17/01/2011		30/01/2011		Baja disponibilidad	--
95005	28/12/2009	8:00:00	31/01/2011	23:00:00	Sin incidencias	--
	20/12/2010		22/12/2010		Baja disponibilidad de datos. También a lo largo del periodo de medida	--
95006	28/12/2009	8:00:00	31/01/2011	22:00:00	Sin incidencias	--
	20/12/2010	10:00:00	22/12/2010	10:00:00	Falta de datos	--
95007	28/12/2009	8:00:00	31/01/2011	22:00:00	Sin incidencias	--
	03/09/2010		28/09/2010		Baja disponibilidad	--
	09/10/2010		18/10/2010		Baja disponibilidad	--
95008	28/12/2009	8:00:00	31/01/2011	22:00:00	Sin incidencias	--
	22/12/2010	12:00:00	22/12/2010	12:00:00	Falta de datos	--
95009	28/12/2009	8:00:00	01/06/2010	14:00:00	Velocidad y dirección nulas	Eliminación de registros
	09/07/2010		17/07/2010		Baja disponibilidad	
	20/12/2010	11:00:00	22/12/2010	11:00:00	Falta de datos	
95010	28/12/2009	8:00:00	31/01/2011	22:00:00	Sin incidencias	--
	20/12/2010	11:00:00	22/12/2010	10:00:00	Falta de datos	--

Fuente: Autor

d.4 CAPÍTULO IV: MODELOS NUMÉRICOS COMPUTACIONALES

El comportamiento del viento puede variar notablemente en función del terreno del emplazamiento elegido. Los valores de la velocidad del viento, en una estación meteorológica, dependen esencialmente de dos factores: los sistemas generales de la climatología, que se extienden generalmente unos cientos de kilómetros, y la topografía en los diez kilómetros cercanos a la estación.

Estrictamente hablando, el uso directo de los datos de velocidad del viento medidos para los cálculos del recurso eólico, es válido solamente para el lugar exacto de medida. La única información facilitada por las mediciones realizadas por la estación meteorológica no permite tener en cuenta la influencia de la orografía y rugosidad del terreno y, sobre todo, no es suficiente para la evaluación del recurso en la totalidad del emplazamiento del parque eólico. Por tanto, es indispensable disponer de algún sistema de “conversión” de esos datos de viento medidos, antes de poder utilizarlos para el cálculo del potencial eólico de toda una región. (Talayero Navales, y otros, 2008)

Cuando se tiene medidas del viento en uno o más puntos, se necesitan métodos de extrapolación de las medidas para la correcta evaluación del recurso en una zona. Las medidas son muy costosas desde el punto de vista económico y de tiempo, es por esto que los modelos son fundamentales para una correcta interpolación entre datos y la predicción del régimen de viento en otro punto.

Los modelos existentes varían desde modelos globales de predicción meteorológica numérica (NWP), hasta modelos de flujo, que simulan pequeños cambios topográficos y de rugosidad.

Para ellos se han desarrollado varios modelos de cálculo de mecánica de fluidos de tal forma que permiten proporcionar más información sobre la evolución espacial del viento en un sector determinado, a través de la “extrapolación vertical y horizontal” de los datos de viento medidos por una estación meteorológica.

d.4.1. MODELOS DE DINÁMICA DE LOS FLUIDOS COMPUTACIONAL

Las técnicas CFD (Computational Fluid Dynamics) se basan en la resolución completa de las ecuaciones de Reynolds Averaged Navier Stokes⁴ (RANS) en combinación con un modelo de cierre turbulento. Se suelen utilizar diferentes modelos de cierre turbulentos con los que se calculan los términos de transporte turbulento; algunos de ellos son los modelos de 0, 1 o 2 ecuaciones y los de cálculo directo de todos los términos de transporte. A estas ecuaciones hay que imponerle condiciones de contorno apropiadas, que incluyen el efecto de la orografía. Por otra parte se debe conocer el flujo entrante, cuyas propiedades se suponen estadísticamente conocidas a partir de una estación meteorológica cercana y trasladarlas al terreno considerado a través del viento geostrófico⁵.

Las ecuaciones de Navier - Stokes se pueden utilizar en la capa fina superficial de la atmósfera solo conjuntamente con métodos más sofisticados de simulación de torbellinos desprendidos (DES: Detached Eddy Simulation). Los métodos DES son muy costosos desde el punto de vista computacional pero son un método prometedor para flujo con muchos desprendimientos de corriente.

Los dos principales programas de CFD especializados en energía eólica son WINDSIM (Windsim user's manual and help. <http://www.windsim.com>); y METEODYN (Meteadyn WT users's manual and help. <http://www.meteodyn.com>).

4 Las ecuaciones de Navier-Stokes reciben su nombre de Claude-Louis Navier y George Gabriel Stokes. Se trata de un conjunto de ecuaciones en derivadas parciales no lineales que describen el movimiento de un fluido.

5 El viento geostrófico es una aproximación física al viento real. En él se considera que existe un equilibrio entre la fuerza de Coriolis y la fuerza generada por el gradiente de presión o fuerza bórica.

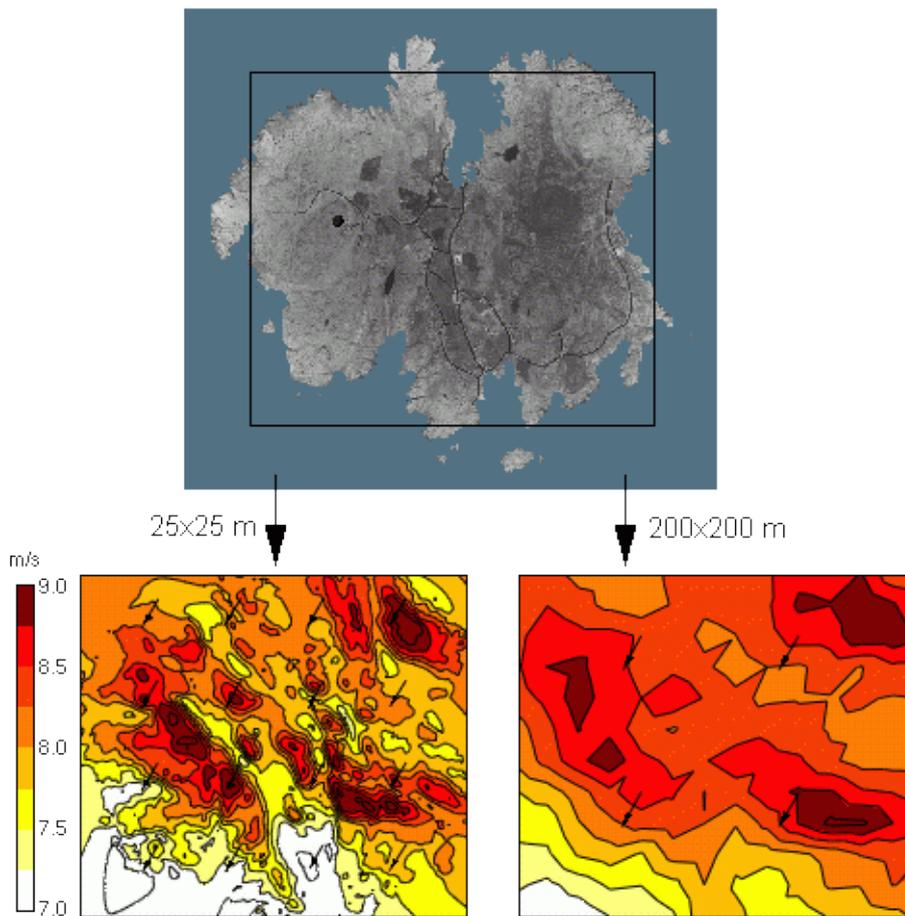


Figura 18. Mapas eólicos a 50 metros de altura, para modelos con diferentes resoluciones de malla.
Fuente: <http://www.windsim.com>

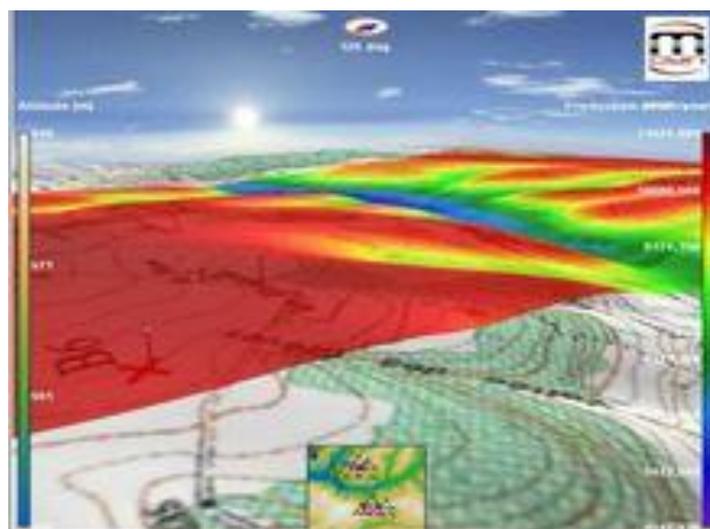


Figura 19. Resolución de las ecuaciones de Navier-Stokes en 3D
Fuente: <http://www.meteodynwt.com>

d.4.2 MODELOS LINEALIZADOS

Estos modelos están basados en la linealización de las ecuaciones de flujo de Navier-Stokes. Por esto, en general, se consideran configuraciones con topografía suave, sin desprendimientos de corriente.

Generalmente están basados en la teoría propuesta por Jackson & Hunt (1975) y recientemente revisado por Belcher & Hunt (1998), y son de utilización en códigos comerciales de uso extendido.

Todos los programas lineales (WAsP, Windpro, Windfarmer) tienen como base de cálculo el modelo definido en WAsP basado en una simplificación (linealización) de las ecuaciones 3D de Navier-Stokes. (Talayero Navales, y otros, 2008)

d.4.3. COMPARACIÓN ENTRE MODELOS

Se analizan ahora las principales debilidades y ventajas de los modelos descritos en particular respecto a su aplicabilidad a proyectos de generación de mapas de caracterización del recurso eólico.

Los modelos CFD son más completos y pueden ofrecer una visión físicamente más realística del viento y del campo de turbulencias. Sin embargo el esfuerzo computacional requerido por estos modelos es considerable y necesitan utilizar una resolución muy elevada para una predicción eficaz; por lo que el tiempo de cálculo sigue siendo una restricción si no se dispone de herramientas de última tecnología. Además, sus prestaciones dependen muchos del tipo de asunciones que hacen para la modelización de la turbulencia. Una considerable incertidumbre está aún relacionada con la cuantificación de la turbulencia y sus efectos sobre el flujo principal. En los últimos años se han llevado a cabo diferentes estudios para la comparación entre modelos CFD y modelos de flujo linealizado, para evaluar la efectiva necesidad de utilizar modelos más complicados y comprobar sus mejoras en las predicciones con topografía compleja.

A continuación se describen algunas diferencias entre los dos principales software comerciales que representan a cada tipo de modelo.

- *WAsP*: Modelo linealizado de flujo potencial de uso extendido.
- *WindSim*: Modelos CFD.

Tabla 8. Resultados de comparaciones entre modelos comerciales: un modelo CFD y uno de flujo linealizado

Análisis	WAsP	CFD
Comparación en la extrapolación horizontal entre medidas y predicciones de la energía producida en dos tipos de terrenos: con pendientes hasta 40° y con pendientes suaves	Error con pendientes hasta 40°: 28,1% Error con pendientes suaves: 14,5%	Error con pendientes hasta 40°: 19,1% Error con pendientes suaves: 14,2%
Comparación en la extrapolación horizontal entre medidas y predicciones de la velocidad media del viento. Las medidas están a 50 m y distancias hasta 5,5 km en terreno moderadamente complejo.	Error medio en la velocidad por sectores: 11,7% Error medio en la dirección: 20,2%	Error medio en la velocidad por sectores: 14,8% Error medio en la dirección: 27,7%
Comparación entre medidas y predicciones con anemómetros a 10 m y 50 m con topografía compleja. Se consideran dos direcciones del viento.	Error medio en la Extrapolación horizontal del 13%.	Error medio en la Extrapolación horizontal del 17%. Error medio de otro modelo CFD: 26%
Comparación entre medidas y energía producida en un parque eólico con topografía variable con medidas a 10 m y 30 m. Las medidas se han extrapolado verticalmente hasta un altura de 55 m.	Sobrestimación del 21%. El error es debido a la forzada aplicación de ley logarítmica.	Sobrestimación del 15%.
Se comparan la extrapolación horizontal y vertical en áreas con diferentes tipos de topografía con mediciones a 10 m y 40 m. Se comparan los errores en la extrapolación horizontal a 10 metros.	Error medio del 5,2% en llano y con colinas. Error del 11,5% con topografía muy compleja.	Error medio del 4,8% en llano y con colinas. Error del 10,6% con topografía muy compleja.

Fuente: (Ranaboldo, 2009)

Como se puede observar, en terreno con pendientes suaves (hasta 30°) los resultados son generalmente parecidos o mejores con el WAsP. En el único caso en que se obtienen predicciones más precisas con el WindSim las diferencias son inferiores al 10% y los autores igualmente aconsejan la utilización de modelos lineales en terreno llano o poco abrupto (Llombart y otros, 2007).

En terreno con topografía más compleja con el modelo CFD se obtienen generalmente estimaciones mejores, debido a una más completa simulación de la turbulencia, aunque no en todos los casos. El único caso en que el WAsP resulta considerablemente menos fiable del WindSim es en la comparación entre las extrapolaciones verticales (Llombart y otros., 2007). Este error no resulta ser significativo para proyectos donde el anemómetro se instala a la misma altura del buje del aerogenerador, como la mayoría de proyectos de electrificación. (Ranaboldo, 2009)

d.4.4. ELECCIÓN DE SOFTWARE A UTILIZAR

Para el presente proyecto de tesis, se utilizó el programa WAsP. La mayor ventaja que tiene este software es el tiempo que tiene de uso en el campo eólico mundial. Todos los actores del sector eólico utilizan WAsP actualmente.

Al contrario que los programas de CFD, como Windsim, al estar basado en modelos de corrección (oroográficos y de rugosidad) lineales, el tiempo de cálculo de WAsP es muy corto. Se estima que, en menos de 20 minutos, se puede obtener la producción de un parque eólico a partir de todos los parámetros de entrada.

Una de las mayores desventajas de los programas CFD reside efectivamente en el tiempo y la potencia de cálculo. Se considera que el cálculo de un campo de viento para obtener la producción de un parque eólico es entre 8 y 12 horas.

Considerando la superficie de terreno que tiene la provincia de Loja (11.027 km²), el tiempo destinado para la realización del presente proyecto, la posibilidad de contar en la Universidad Nacional de Loja con una evaluación de prueba del software, y la asesoría por parte del CIRCE, se ha optado por la elección de WAsP como modelo para la “Caracterización del recurso eólico en la provincia de Loja”.

d.4.5. WAsP (Wind Atlas Analysis and Application Program)

WAsP es un programa comercial de flujo linealizado comúnmente usado para análisis del recurso eólico a micro-escala (escalas espaciales entre 1 m y 5 km). Fue desarrollado por Risø National Laboratory para realizar el Mapa Eólico Europeo.

El modelo orográfico usado por WAsP se basa en las extensiones 3D de las ecuaciones originales lineales 2D desarrolladas por Jackson y Hunt (1975) para flujo de viento sobre pequeñas colinas. Además, el programa incluye dos modelos para la simulación de los cambios de rugosidad y los obstáculos. A través de esos modelos el programa puede generalizar una serie de datos meteorológicos en un sitio de referencia, en un atlas de viento de la región que hace referencia a un ficticio sitio plano sujeto al mismo régimen de viento. El atlas se puede luego utilizar para el cálculo del viento en cualquier punto del mapa.

d.4.5.1. METODOLOGÍA DE WAsP

El programa necesita como datos de entrada las siguientes informaciones:

- datos de viento de un emplazamiento;
- capa de las curvas de niveles de la zona;
- mapa de rugosidad de la zona;
- obstáculos.

Los *datos de viento* están constituidos por las medidas de velocidad y dirección de un anemómetro y una veleta, normalmente promediadas cada 10 minutos o 1 hora. La fiabilidad de las medidas es determinante para obtener resultados precisos y realistas. Por esto, es necesario validar los datos y quitar aquellos valores que sean fruto de errores de medida o de cambios más rápidos de la sensibilidad de los instrumentos. Cabe destacar que el programa siempre ajusta las medidas de viento a una distribución de Weibull; en algunos casos los errores debidos a esta aproximación pueden ser consistentes: se han reportados casos de diferencias entre la distribución real y la distribución de Weibull mayores al 5 % (Moreno y otros, 2003, Milanese y otros, 2008).

El *mapa topográfico* insertado tiene un efecto determinante sobre el cálculo en terrenos montañosos. Dos parámetros principalmente definen el mapa insertado: el tamaño y el intervalo entre las curvas de nivel.

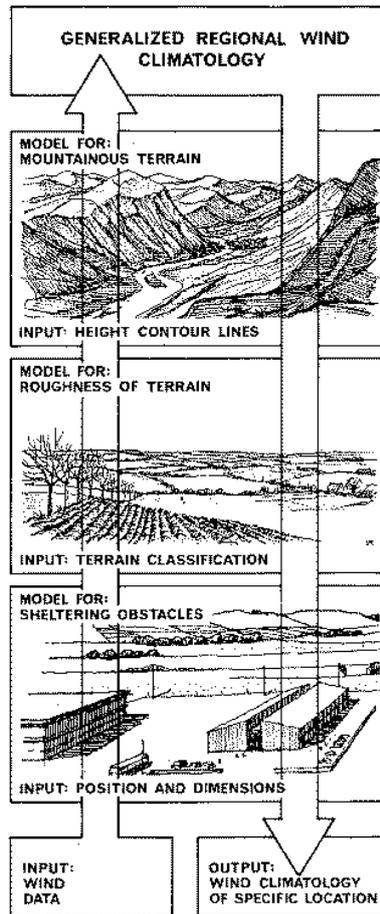


Figura 20. .La metodología del atlas de viento utilizada por el WASP
Fuente: Troen y Petersen, 1989

El programa tiene como principales ventajas: primero que es el estándar y entonces diferentes atlas de viento pueden ser comparados y entendidos directamente por una amplia comunidad; segundo, que permite determinar el viento en sitio específico con elevada precisión. Sin embargo, la precisión de las predicciones depende de si se cumplen algunas condiciones:

- El sitio de medida y el sitio donde se hace la predicción tienen que estar sujetos al mismo régimen climático, según la escala de los principales sistemas climáticos sinópticos;
- Las condiciones atmosféricas prevalentes se acercan a una atmósfera neutralmente estable;
- La topografía no es muy abrupta, suficientemente suave para asegurar un flujo predominante sin desprendimientos y mínimos efectos a gran escala del terreno, tal como canalizaciones, etc.;
- Los datos meteorológicos de referencia son fiables.

Existe mucha literatura respecto a las prestaciones del programa y sus límites son bien conocidos. El error en la predicción de la velocidad media del viento depende principalmente del grado por el cual se sale de las condiciones atmosféricas y topográficas para las cuales el modelo ha sido diseñado.

El efecto de las *condiciones atmosféricas* predominantes sobre el cálculo del incremento de la velocidad, puede variar mucho dependiendo del sitio. En sitios montañosos, como los de la sierra andina, las condiciones atmosféricas predominantes tienden a ser ligeramente inestables, debido al frecuente calentamiento de las laderas durante todo el año. Por lo que generalmente el error debido a la aproximación a condiciones atmosféricas neutras suele ser pequeño en este tipo de orografía. Como anteriormente se ha indicado, el sitio donde se realizan las medidas y la zona de predicción tienen que estar sujetos al mismo régimen de viento. Un buen indicador es el nivel de correlación entre las velocidades de los dos sitios. En general, un coeficiente de correlación superior al 60% se puede considerar suficiente para considerar que los dos sitios estén bajo el mismo régimen sinóptico (Bowen y Mortensen, 2004).

Otro factor fundamental directamente relacionado con la precisión de los cálculos es la *topografía* de la zona: la aplicabilidad del modelo de linealización del flujo está limitada a áreas con pendientes suaves sin desprendimientos ni separación del flujo. Un parámetro importante para definir sus límites operacionales resulta entonces ser la pendiente máxima a partir de la cual hay separación del flujo; un valor razonable

comúnmente aceptado es entre 17° y 22° dependiendo de la rugosidad (Wood, 1995) y la fracción de terreno de alrededor que se encuentra por encima de una pendiente crítica, por defecto 17° , se denomina RIX (Roughness Index); este parámetro ha sido propuesto como una medida de la extensión de separación de flujo (Mortensen y otros, 1993) y da una idea de la aplicabilidad de modelo. Las predicciones de WASP sobre colinas aisladas se ajustan bien a los resultados de los experimentos internacionales en Blasheval (Walmsley et al., 1990) y en el Askervein Hill (Taylor & Teunissen, 1987), con pendientes hasta 24° y 21° respectivamente. Sin embargo, el programa, como otros modelos lineales, sobrestima ligeramente la velocidad del viento superficial a sotavento de la colina donde están presentes algunos desprendimientos de corriente. La figura muestra como el incremento de velocidad a 10 m sobre el terreno en la cima del nivel del suelo llega a un 80% respecto al viento sin efectos topográficos a barlovento (aguas arriba), mientras el decremento al frente y a sotavento de la colina es entre el 20 y el 40%.

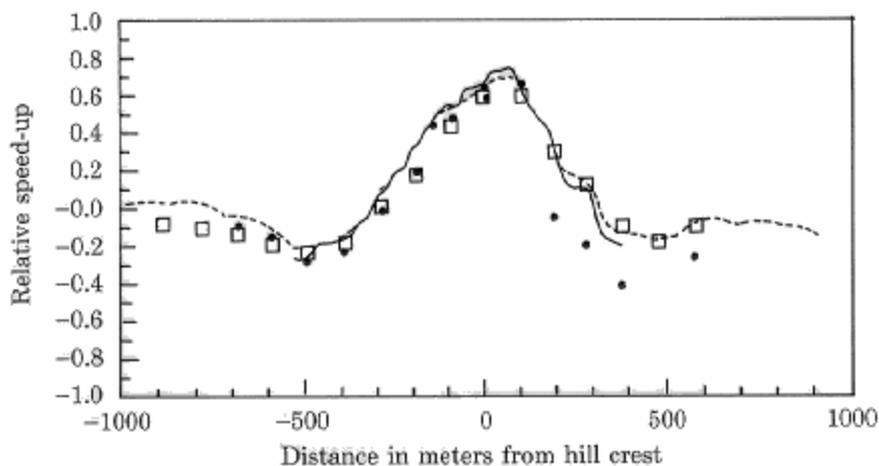
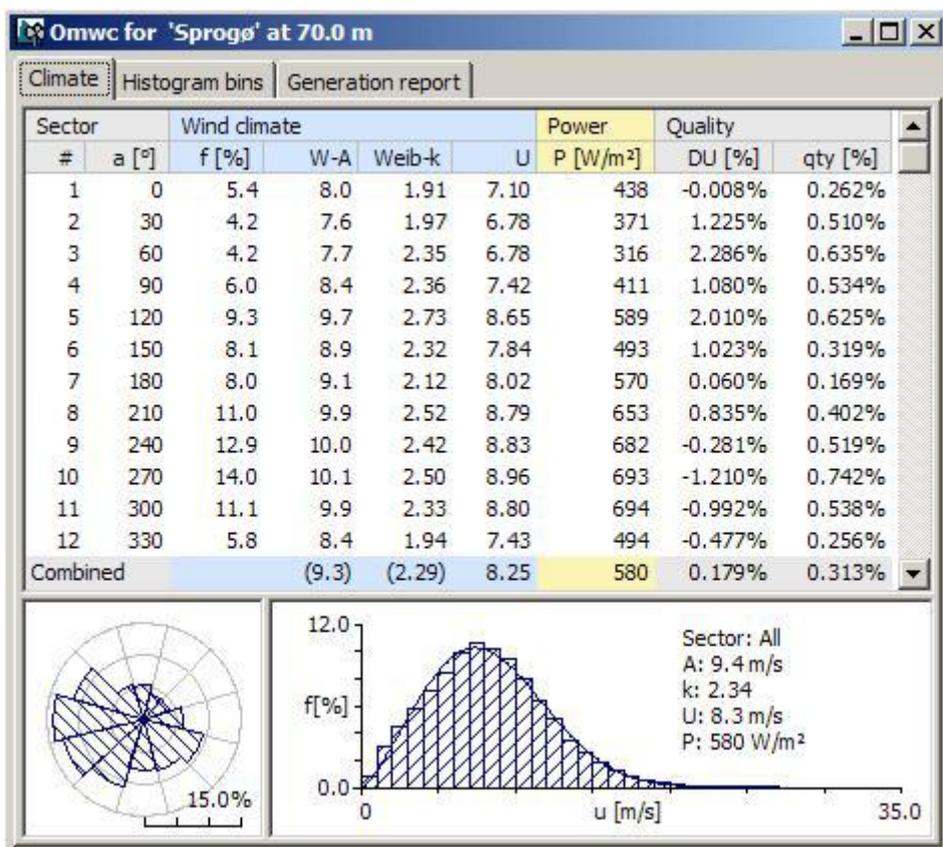


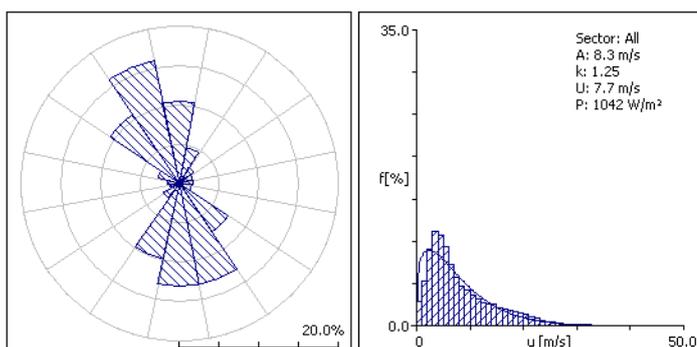
Figura21. Incrementos relativos de velocidad del flujo sobre una colina a 10 m sobre el suelo. Las medidas se indican con puntos; los resultados del WASP con cuadrados. Las líneas representan las predicciones de otros dos modelos de linealización del flujo.

Fuente: (Troen y Petersen, 1989)

En general, está confirmado que el programa simula bien el campo de viento en terrenos con colinas suaves. El error característico es del 10% con longitud característica de 1-2 km y pendientes inferiores a 17° (Venäläinen y otros, 2003).



	Unit	Measured	Weibull-fit	Discrepancy
Mean wind speed	m/s	5.98	5.86	1.90%
Mean power density	W/m²	440.28	440.72	0.10%



	0	22.5	45	67.5	90	112.5	135	157.5	180	202.5	225	247.5	270	292.5	315	337.5	Total
A	2.0	1.9	2.0	2.5	11.5	11.0	4.4	3.6	3.7	3.7	4.7	6.3	4.8	3.2	3.0	3.1	6.3
k	0.94	1.50	1.44	1.24	2.35	2.11	1.38	1.74	1.96	1.41	1.65	2.36	2.46	1.35	1.62	1.37	1.27
U	2.01	1.68	1.78	2.31	10.16	9.78	3.98	3.17	3.32	3.34	4.18	5.58	4.29	2.96	2.69	2.88	5.86
P	35	8	10	28	1062	1039	119	43	44	69	107	175	77	51	29	46	441
Freq	2	2	2	3	21	16	3	2	3	4	4	8	13	7	6	4	100

Figura 22. Rosa de viento y ajustes de Weibull estimado por WAsP para una serie de datos meteorológicos.

Fuente: (Talayero Navales, y otros, 2008)

WAsP es capaz de estimar el viento en el sitio mediante datos del viento en un punto y un mapa topográfico. WAsP, por ejemplo, tiene un editor de mapas al cual se le puede importar mapas y editarlos.

Los archivos de capas cartográficas más utilizados son del formato vectorial (*.shp) o “*shapefiles*”, y necesarios para evaluar la distribución espacial del viento y la energía disponible de un sitio, éstos tienen la información de altura o curvas de nivel. Los shapefiles pueden ser modificados en programas denominados Sistema de Información Geográfico o SIG (GIS en inglés).

WAsP necesita que los mapas estén en formato BNA, MAP (de WAsP terrain map file) o DXF (de AutoCAD). Existe software que convierte los mapas en formato SHP (shapefiles) a estos otros.

De esta forma, WAsP puede construir mapas de recurso eólico, y representar velocidad media, densidad de potencia, parámetros de Weibull para toda la zona de interés.

d.4.6. OROGRAFÍA Y RUGOSIDAD

La **orografía** se refiere a las elevaciones que puedan existir en una zona en particular.

Para WAsP, se recomienda usar un mapa de una extensión entre 10 y 20 km alrededor de las turbinas del parque, con una definición en 1km alrededor de las mismas de entre 2 y 5 m de diferencia entre curvas de nivel pudiéndose, si el mapa lo permite, espaciarse en el resto a curvas cada 10-20 m.

Para obtener los mapas en formato *.map (utilizado por WAsP), se puede usar el programa WAsP Map Editor, herramienta complementaria para la digitalización de mapas. Se puede usar una tabla digitalizadora, pero lo más recomendable es utilizar un mapa de alta definición usado para la construcción del proyecto y completar con un mapa extraído de una base de datos existentes. (Talayero Navales, y otros, 2008)

A continuación se presenta un ejemplo de mapa de orografía utilizado por WAsP.

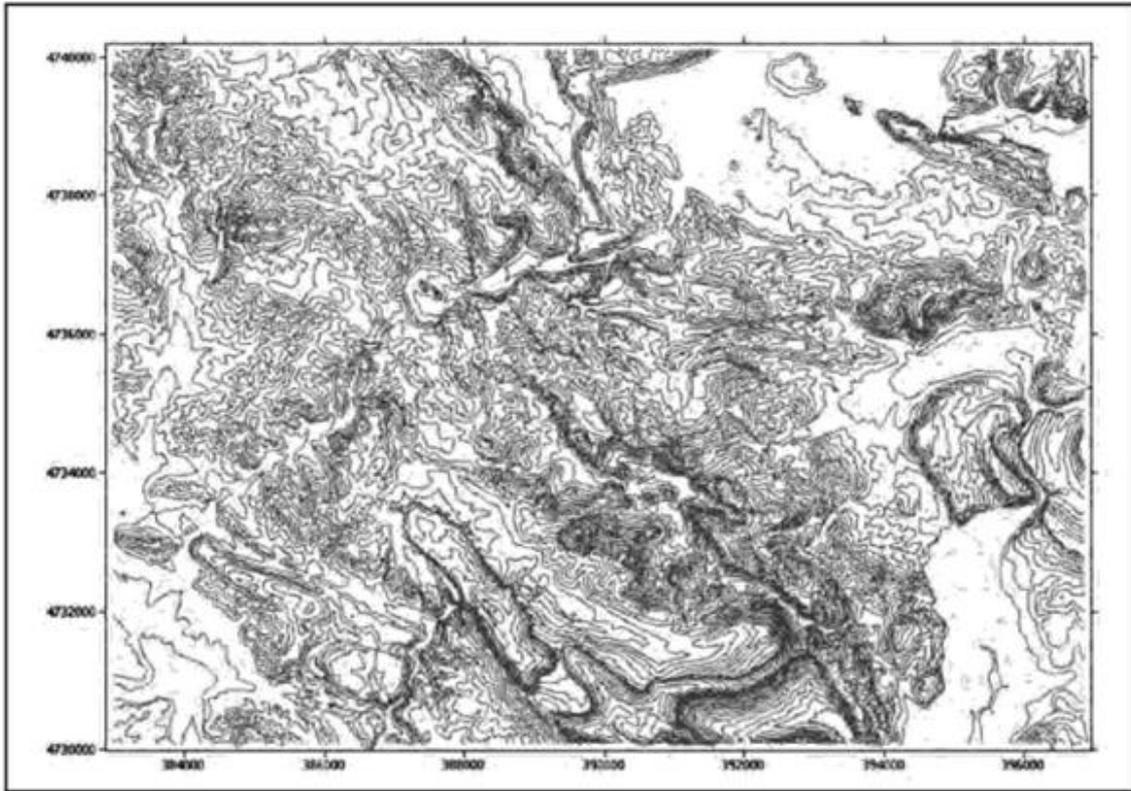


Figura23. Mapa de orografía utilizado por WAsP.

Fuente: (Talayero Navales, y otros, 2008)

Se define como **rugosidad** todo aquello que está sobre la corteza terrestre y no se contempla como un obstáculo. La medida de rugosidad es subjetiva al ojo del proyectista, pero a modo de ejemplo se adjunta los valores de longitud de rugosidad, caracterizados por Risø National Laboratory para clasificar los emplazamientos.

En WAsP, los mapas de rugosidad se definen como líneas de separación entre zonas de diferentes rugosidades, caracterizadas por su valor de longitud de rugosidad. (Talayero Navales, y otros, 2008)

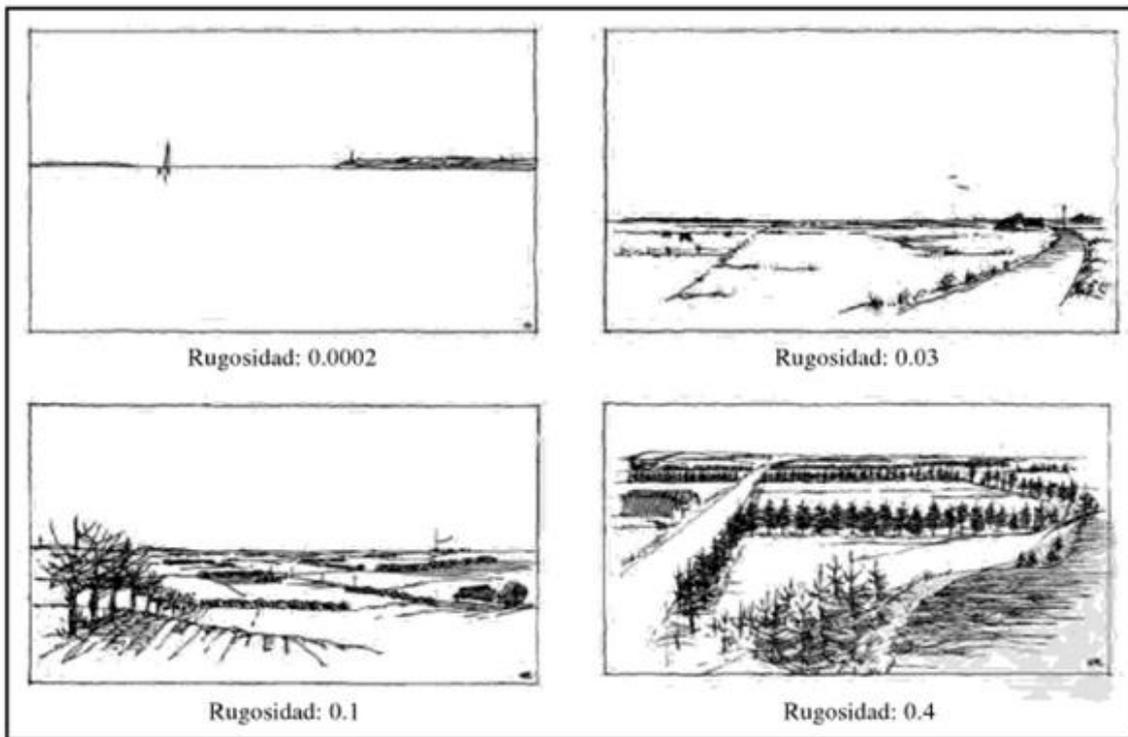


Figura 24. Ejemplos de clasificaciones estándares de terreno en función de su rugosidad.
Fuente: ayuda WAsP.

Una de las clasificaciones estándares más utilizada se muestra a continuación:

Tabla 9. Clasificación estándar de terreno en función de su longitud y clase de rugosidad

Zo(m)	Características del terreno	Clase de rugosidad
1.00	Ciudad	
0.80	Bosque	
0.50	Suburbios	
0.40	Bosques o granjas separados	3
0.30	Cinturón de edificios	
0.20	Algunos árboles o arbustos	2
0.10	Terreno cultivado con apariencia cerrada	
0.05	Terreno cultivado con apariencia abierta	1
0.03	Terreno cultivado con algún edificio o árbol	
0.02	Áreas de aeropuertos con edificios y árboles	
0.01	Pistas de aterrizaje	
0.008	Hierba baja	
0.005	Tierra sin vegetación	
0.001	Superficies nevadas	
0.0003	Superficies de arena	
0.0002	Mares y lagos	0

Fuente: (Talayero Navales, y otros, 2008)

LA construcción del índice de rugosidad parte de un *modelo de elevación digital* (MED). Un MED es esencialmente una matriz de datos georeferenciada en la que en cada celda se hace constar el dato de altitud (en un determinado sistema geodésico) y que va referido al centro de dicha celda.

En la actualidad existen varios modelos de altitud del terreno de carácter global y acceso público. El primero de ellos fue el *GTOPO30*, desarrollado por el *US Geological Survey*, con una resolución de 1km y una precisión vertical es de unos 30 metros.

El modelo más reciente y preciso, el SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), desarrollado por la NASA (*National Aeronautics and Space Administration*), mediante técnicas de teledetección⁶. Ofrece actualmente una resolución planimétrica de 90 metros aproximadamente y una precisión altimétrica de 16 metros.

Dado un MED, el primer paso consiste en construir un *modelo digital del terreno* (MDT) de rugosidades para la Región Sur del País.

El MDT tiene la misma estructura que un MED; pero, en lugar de altitudes, los valores de cada celda contienen otra información susceptible de ser georeferenciada, en nuestro caso *rugosidades*.

Las herramientas informáticas utilizadas se basan en *sistemas de información geográfica* (SIG). En concreto, tanto para el manejo de los archivos de elevaciones del terreno, de tipo *raster*, o de tipo vectorial, se ha empleado IDRISI (es una solución software con SIG integrado y procesamiento de imágenes para el análisis y presentación de información espacial digital)

Los datos del modelo SRTM se obtuvieron de su URL: <http://srtm.csi.cgiar.org/>, o también en <http://earthexplorer.usgs.gov/>.

Se trata de archivos de unos 30 Mb cada uno comprimidos (extensión *.zip). Su extracción da lugar a archivos de 180 Mb, en formato ASCII y acompañados de un archivo de proyección (*.prj). Se trata de un formato estándar para MED y que se abren directamente en un SIG.

⁶ La teledetección o detección remota es la adquisición de información a pequeña o gran escala de un objeto o fenómeno, ya sea usando instrumentos de grabación o instrumentos de escaneo en tiempo real inalámbricos o que no están en contacto directo con el objeto (como por ejemplo aviones, satélites, astronave, boyas o barcos)

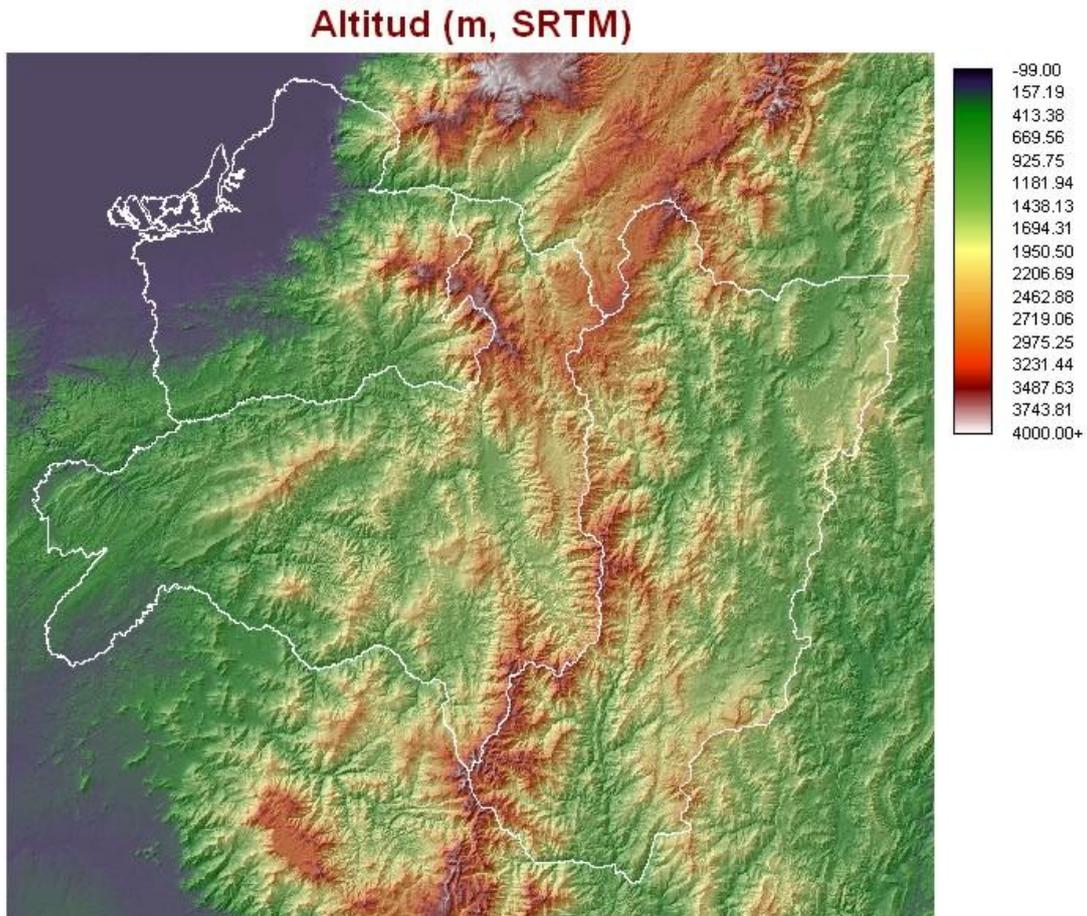


Figura 25. Modelo de altitud de la Región Sur del Ecuador.
Fuente: *Autor*

El viento es inestable a través del tiempo. Aunque existe una relación entre la velocidad del viento medida en verano y la medida en invierno de un mismo año, esto no es así entre un año y otro. Fenómenos climáticos como El Niño y La Niña pueden afectar la velocidad del viento de un sitio hasta en un 30%, favoreciendo ciertas zonas y perjudicando otras.

Por lo general, los proyectos eólicos tienen una vida útil de 20 años, lo que significa que no es recomendado arriesgarse a evaluar el proyecto solo usando los datos tomados durante un año. Para estimar el recurso eólico disponible lo que se suele hacer es correlacionar los datos tomados en el sitio con la información histórica de una estación meteorológica cercana. Luego con distintos métodos, como regresión lineal o redes neuronales, se estima el viento futuro en el sitio usando los datos de la estación meteorológica de hasta 20 años atrás. Este método es conocido como Medir-Correlacionar-Predecir o MCP.

e.- MATERIALES Y MÉTODOS

e.1 Materiales

Hardware:

- PC de escritorio:
 - Sistema Operativo de 64 bits: Windows 7.
 - Procesador: mínimo 2.1 GHz
 - Memoria RAM: mínimo 4 GB

Software:

- WAsP versión 10.1
- Windographer 2.0.1
- Sistema de Información Geográfica: IDRISI SELVA
- Modelo disponible on-line, SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*)
- Microsoft Excel 2010.

e.2 Métodos

Para la realización del presente trabajo de investigación, se ha utilizado el **método empírico – analítico**, que es un modelo de investigación científica, que se basa en la experimentación y la lógica empírica, que junto a la observación de fenómenos y su análisis estadístico, es el más usado en el campo de las energías renovables y ciencias meteorológicas.

También se ha utilizado el **método de la medición**, que se desarrolla con el objetivo de obtener información numérica acerca de una propiedad o cualidad del objeto, proceso o fenómeno, donde se comparan magnitudes medibles conocidas, y en base a este método, se ha utilizado **procedimientos estadísticos**, especialmente, en el manejo de la gran cantidad de datos pertenecientes a cada estación meteorológica.

En la utilización del software de modelización, se aplicó un **modelo matemático**, que es uno de los tipos de **modelos científicos**, para estudiar comportamientos de sistemas complejos ante situaciones difíciles de observar en la realidad. Este método, fue determinante para la realización de los gráficos y mapas, que son los resultados finales y más importantes del presente trabajo investigativo.

e.2.1. METODOLOGÍA Y PROCEDIMIENTO

A continuación se describe la metodología utilizada:

1. DATOS DE PARTIDA

Los datos necesarios para la elaboración del mapa eólico de Loja, han sido proporcionados por el INAMHI, y se describen a continuación:

- Datos de viento medidos de 10 estaciones.
- Posición y características de las estaciones meteorológicas.
- Datos cartográficos y de rugosidad del emplazamiento objeto de estudio (elaborado por CIRCE)



Figura 26. Ubicación de la provincia de Loja - Ecuador.

Fuente: Autor

Se ha realizado un mallado de la provincia de Loja, con una resolución horizontal de 1 km para obtener en cada nodo de la malla las siguientes variables:

- Velocidad media
- Coeficientes A y k de la distribución de Weibulll
- Densidad de potencia
- Rosa de frecuencia con 16 sectores.

En la siguiente figura se presenta el mapa en 2D con las curvas de nivel cada 100 m de la provincia de Loja y la ubicación de las estaciones de medida.

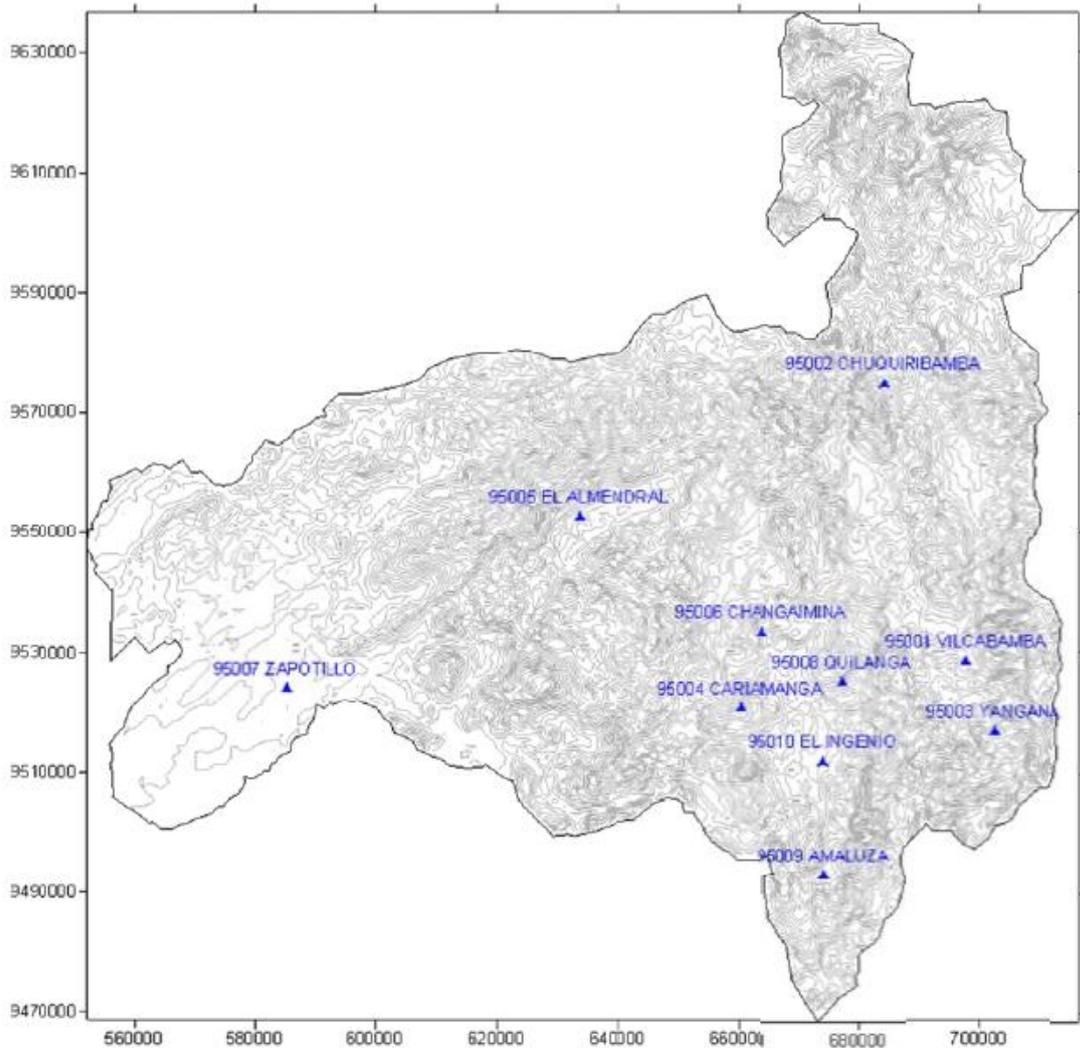


Figura 27. Posición de las estaciones meteorológicas dentro de la provincia de Loja.

Fuente: *Autor*

2. CAMPAÑA DE MEDIDAS DE VIENTO

Antes de realizar cualquier evaluación del recurso y del potencial energético, es imprescindible analizar los datos registrados en las estaciones meteorológicas con objeto de asegurar la calidad de los mismos.

A menudo existen registros medidos que presentan datos erróneos de dirección y/o de velocidad, por lo tanto es necesario realizar un tratamiento adecuado de los datos.

3. ESTACIONES DE MEDIDA

Los datos de las estaciones meteorológicas ubicadas en la provincia de Loja, han sido proporcionados por el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología de Ecuador (INAMHI).

Se dispone de datos horarios de velocidad y dirección de viento de 10 estaciones cuyas coordenadas, niveles y periodos de medida se detallan a continuación.

Tabla 10. Información de las estaciones meteorológicas

Estación meteorológica		Coordenadas WGS84 (Huso -17)		Alturas de medida velocidad (m)	Periodos de medida
		X _{UTM} (m)	Y _{UTM} (m)		
VILCABAMBA	95001	697711	9528770	10	28/12/2009 – 31/01/2001
CHUQUIRIBAMBA	95002	684140	9574901	10	28/12/2009 – 31/01/2001
YANGANA	95003	702481	9516977	10	28/12/2009 – 31/01/2001
CARIAMANGA	95004	660441	9520882	10	28/12/2009 – 31/01/2001
EL ALMENDRAL	95005	633755	9552910	10	28/12/2009 – 31/01/2001
CHANGAIMINA	95006	663873	9533582	10	28/12/2009 – 31/01/2001
ZAPOTILLO	95007	585171	9524262	10	28/12/2009 – 31/01/2001
QUILANGA	95008	677263	9525256	10	28/12/2009 – 31/01/2001
AMALUZA	95009	674129	9493053	10	28/12/2009 – 31/01/2001
EL INGENIO	95010	674009	9511870	10	28/12/2009 – 31/01/2001

Fuente: Autor

En el “ANEXO I: Estudio de la campaña de medida de viento”, se describen las principales incidencias detectadas en el tratamiento de los datos.

Tras realizar el tratamiento de los datos de las 10 estaciones del emplazamiento estudiado, se han encontrado algunas incidencias durante el periodo de medida comprendido entre 28/12/2009 y el 31/01/2011.

Es necesario destacar que se han eliminado todo aquellos registros con valores nulos de forma simultánea en la velocidad media, velocidad máxima y dirección del viento, ya que según el INAMHI se corresponden con un falta de medida.

Además existen registros con valores nulos únicamente en la variable de la velocidad medida, por lo que se han considerado como calmas medidas en el emplazamiento por las distintas estaciones.

Por otro lado, debido al hecho de que los datos de las torres se registran únicamente a 10m de altura, no se va a poder caracterizar la evolución de la velocidad con la altura (perfil vertical), por lo que se hará una estimación a partir de la extrapolación que realiza el programa de simulación WAsP.

4. VELOCIDADES MEDIAS MENSUALES

A partir de los *datos filtrados*⁷ se han calculado las velocidades medias mensuales para el nivel de medida, de las estaciones meteorológicas estudiadas. Estas tablas se muestran en el “ANEXO I: Estudio de la campaña de medida de viento”.

⁷ El término “datos filtrados” hace referencia a aquellos datos considerados como válidos después del proceso de filtrado y antes de un posible proceso de regeneración.

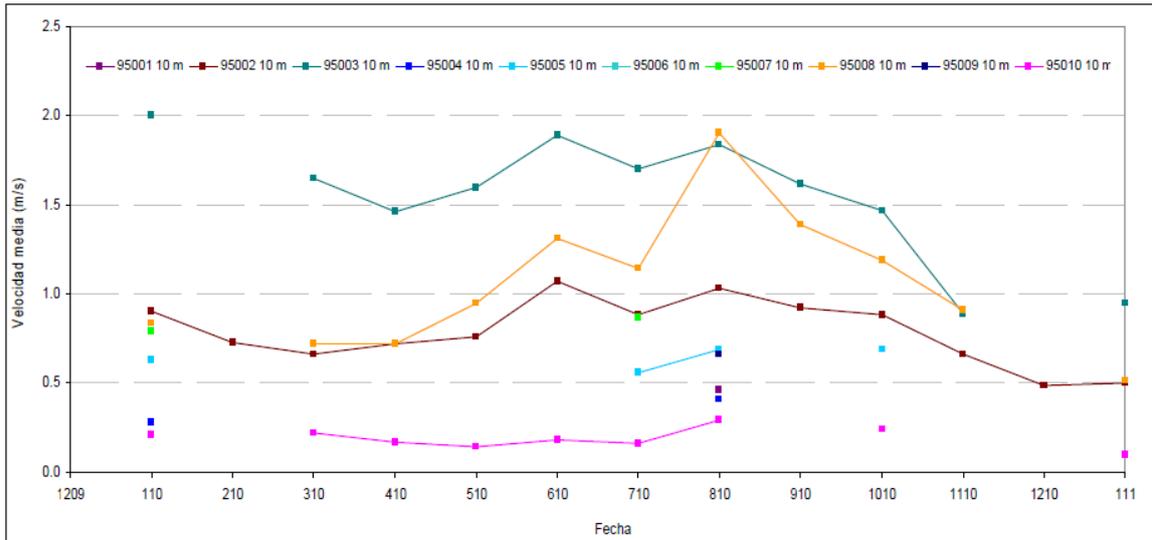


Figura 28. Evolución temporal de la velocidad media del viento. Datos horarios.
Fuente: Autor

En la figura 28, se muestra la evolución temporal de la velocidad del viento del nivel de medida de cada una de las torres meteorológicas teniendo en cuenta únicamente valores con una disponibilidad cercana al 90%.

Se puede apreciar la baja disponibilidad de los datos en la mayoría de las estaciones, por lo que con el objeto de llevar a cabo una posible regeneración de los datos, se han realizado correlaciones de valores de velocidad tanto horario como diarios.

5. CARACTERIZACIÓN DEL PERIODO DE REFERENCIA

Una de las principales características del viento es su variabilidad anual, estacional y diaria. Esto significa que la velocidad media del viento puede oscilar de un año a otro y por lo tanto también variará el recurso eólico de un determinado emplazamiento.

Para evaluar el recurso eólico de una zona, es necesario disponer de una serie de años enteros de medidas del viento, sin huecos estacionales y, además, debe tener el mayor número posibles de datos. Al tiempo, debe ser representativo de las condiciones de viento esperables en el emplazamiento a lo largo de los años.

6. ELECCIÓN DEL PERIODO DE REFERENCIA

En la tabla siguiente se muestran la velocidad media, número de datos y disponibilidad, de los posibles periodos de un año, junto con la velocidad media acumulada en el nivel de medida de las estaciones ubicadas en el emplazamiento estudiado.

Tabla 11. Periodo de referencia y M.A. (velocidad media acumulada, en m/s) durante el periodo completo de medidas horarias de las estaciones meteorológicas.

	1209/1110	110/1210	210/111	M.A.
95001	0.38	0.37	0.37	0.37
10 m	5703	6022	5910	
	65.1%	68.7%	67.5%	
95002	0.84	0.81	0.78	0.79
10 m	7724	8286	8247	
	88.2%	94.6%	94.1%	
95003	1.61	1.55	1.46	1.50
10 m	7681	8214	8155	
	87.7%	93.8%	93.1%	
95004	0.36	0.35	0.36	0.35
10 m	6830	7279	7037	
	78.0%	83.1%	80.3%	
95005	0.57	0.57	0.57	0.58
10 m	7078	7599	7557	
	80.8%	86.7%	86.3%	
95006	0.28	0.27	0.26	0.27
10 m	6539	6872	6755	
	74.6%	78.4%	77.1%	
95007	0.85	0.87	0.91	0.90
10 m	6529	7036	6996	
	74.5%	80.3%	79.9%	
95008	1.09	1.05	1.02	1.01
10 m	7710	8277	8268	
	88.0%	94.5%	94.4%	
95009	0.52	0.49	0.48	0.48
10 m	3721	4256	4807	
	42.5%	48.6%	54.9%	
95010	0.19	0.19	0.18	0.18
10 m	7359	7915	7884	
	84.0%	90.4%	90.0%	

Fuente: Autor

Para realizar la caracterización del viento, se ha tomado como periodo de referencia el periodo de medida que va de enero de 2010 a diciembre de 2010, teniendo en cuenta un periodo común a todas las estaciones y la disponibilidad de dicho periodo.

f.- RESULTADOS

En este apartado se presentan los resultados del análisis de los registros de viento horarios, así como los resultados de la modelización al utilizar el software WAsP. Se puede ver de forma detallada el análisis de estos registros en el “ANEXO II: Tratamiento estadístico de los datos durante el periodo de de referencia”.

1. RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE LAS ESTACIONES.

1. 1. ESTACIÓN 95001_VILCABAMBA (10 m)

Durante el periodo de referencia esta estación contiene 6022 datos filtrados registrados a 10 m, con una velocidad media de 0.37 m/s.

En la siguiente figura se muestra la distribución de frecuencias de viento por intervalos de velocidad a 10m de altura. También se muestra la curva de duración del viento que representa la frecuencia de vientos con velocidades por encima de un determinado valor.

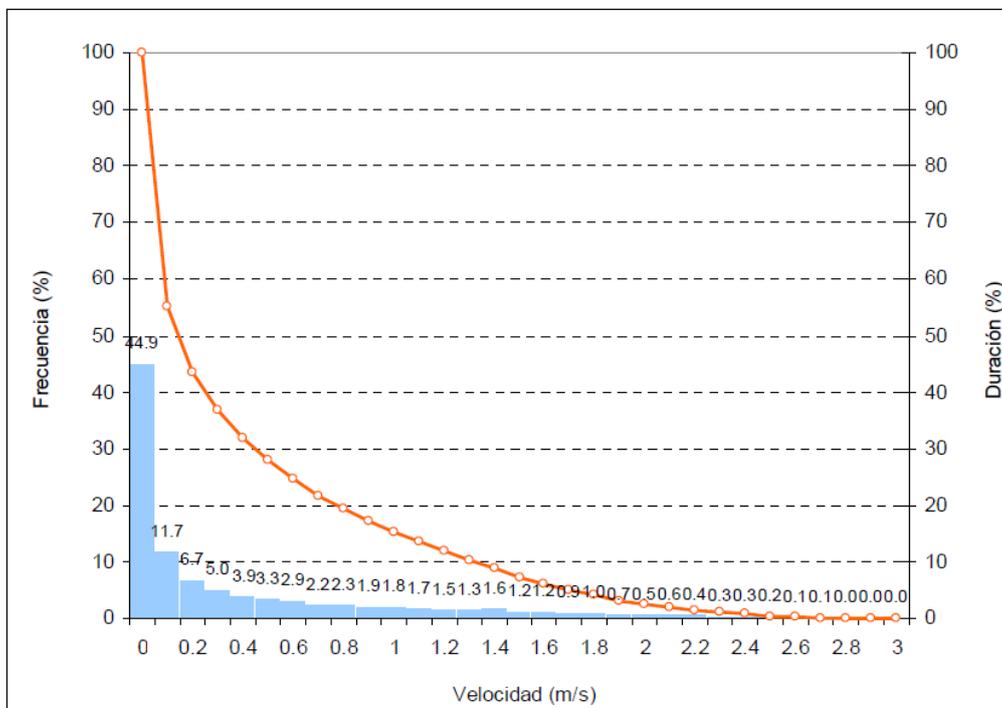


Figura 29. Frecuencia de viento por intervalos de velocidad y curva de duración del viento en la estación 95001 a 10 m de altura de medida.

Fuente: Autor

Los parámetros de la distribución de Weibull a los que se ajustan la serie de registros de viento, corresponden a un factor de escala (A) de 0.3 m/s, y un factor de forma (k) de 0.75.

A continuación se representan la rosa de frecuencias y la rosa de velocidad correspondiente al periodo de referencia de la estación caracterizada.

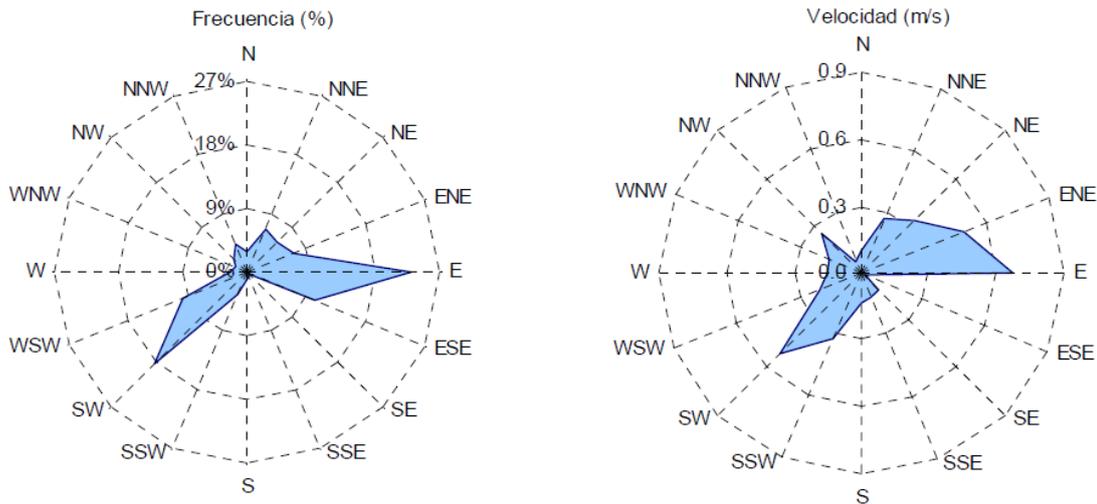


Figura 30. Rosa de direcciones medias de viento y rosa de velocidad media del viento a 10 m de altura durante el periodo de referencia. Estación 95001.

Fuente: Autor

1.2. Estación 95002_ CHUQUIRIBAMBA (10 m)

Durante el periodo de referencia esta estación contiene 8286 datos filtrados registrados a 10 m, con una velocidad media de 0.81 m/s.

En la siguiente figura se muestra la distribución de frecuencias de viento por intervalos de velocidad a 10m de altura. También se muestra la curva de duración del viento que representa la frecuencia de vientos con velocidades por encima de un determinado valor.

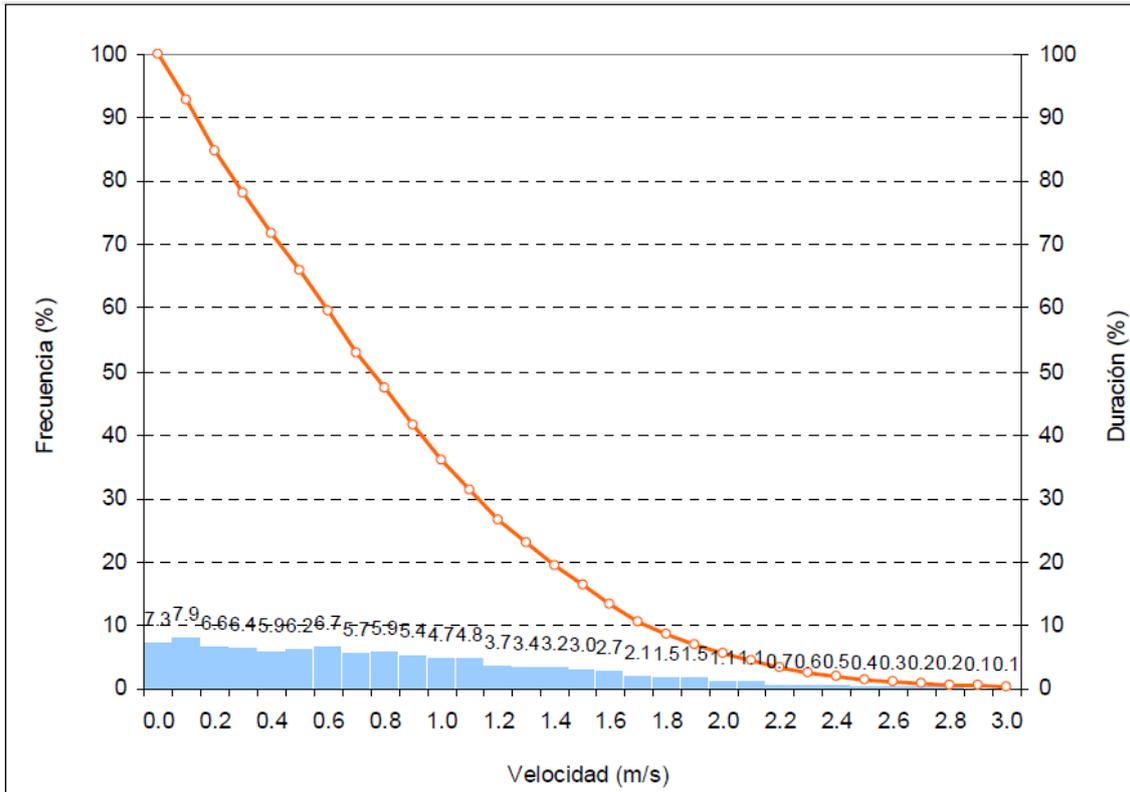


Figura 31. Frecuencia de viento por intervalos de velocidad y curva de duración del viento en la estación 95002 a 10 m de altura de medida.

Fuente: Autor

Los parámetros de la distribución de Weibull a los que se ajustan la serie de registros de viento, corresponden a un factor de escala (A) de 0.9 m/s, y un factor de forma (k) de 1.44. A continuación se representan la rosa de frecuencias y la rosa de velocidad correspondiente al periodo de referencia de la estación caracterizada.

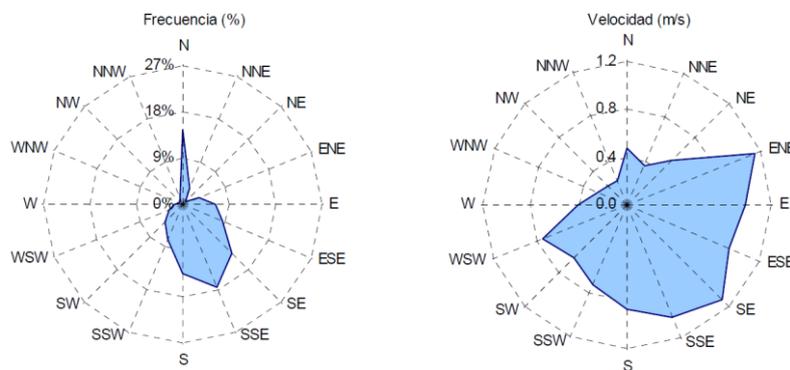


Figura 32. Rosa de direcciones medias de viento y rosa de velocidad media del viento a 10 m de altura durante el periodo de referencia. Estación 95002.

Fuente: Autor

1.3. Estación 95003__YANGANA (10 m)

Durante el periodo de referencia esta estación contiene 8214 datos filtrados registrados a 10 m, con una velocidad media de 1.55 m/s.

En la siguiente figura se muestra la distribución de frecuencias de viento por intervalos de velocidad a 10m de altura. También se muestra la curva de duración del viento que representa la frecuencia de vientos con velocidades por encima de un determinado valor.

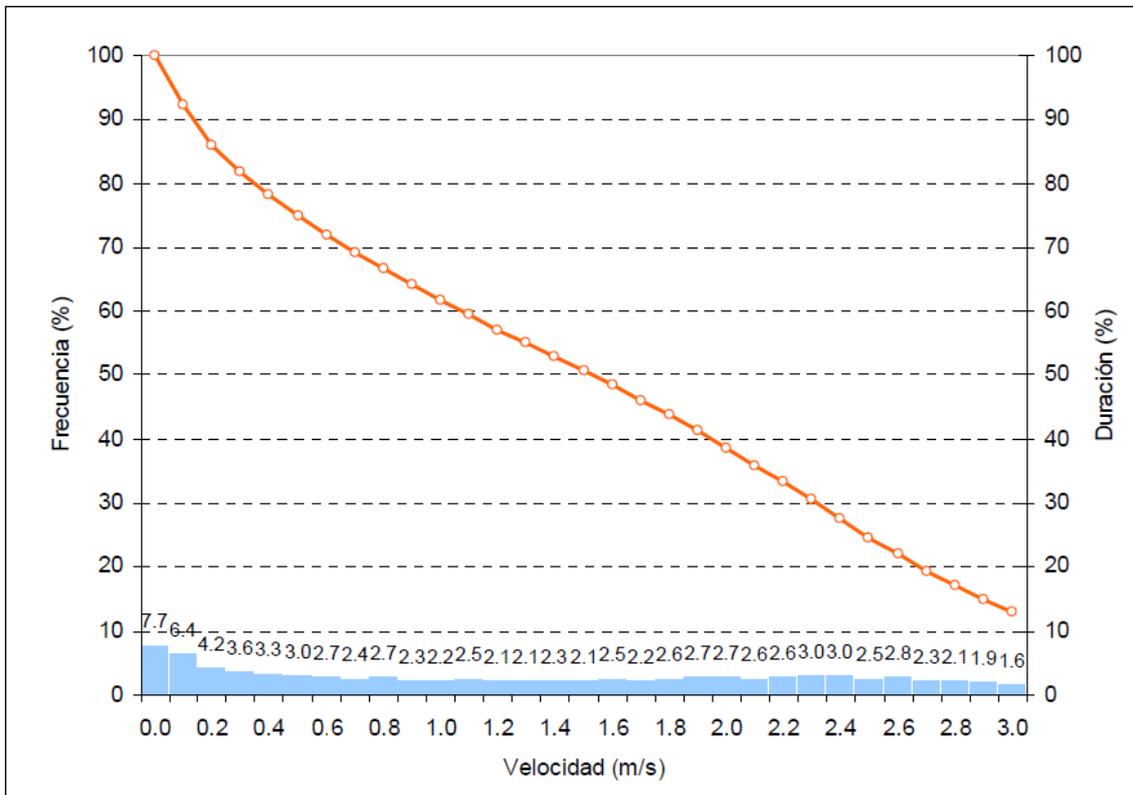


Figura 33. Frecuencia de viento por intervalos de velocidad y curva de duración del viento en la estación 95003 a 10 m de altura de medida.

Fuente: Autor

Los parámetros de la distribución de Weibull a los que se ajustan la serie de registros de viento, corresponden a un factor de escala (A) de 1.9 m/s, y un factor de forma (k) de 1.69.

A continuación se representan la rosa de frecuencias y la rosa de velocidad correspondiente al periodo de referencia de la estación caracterizada.

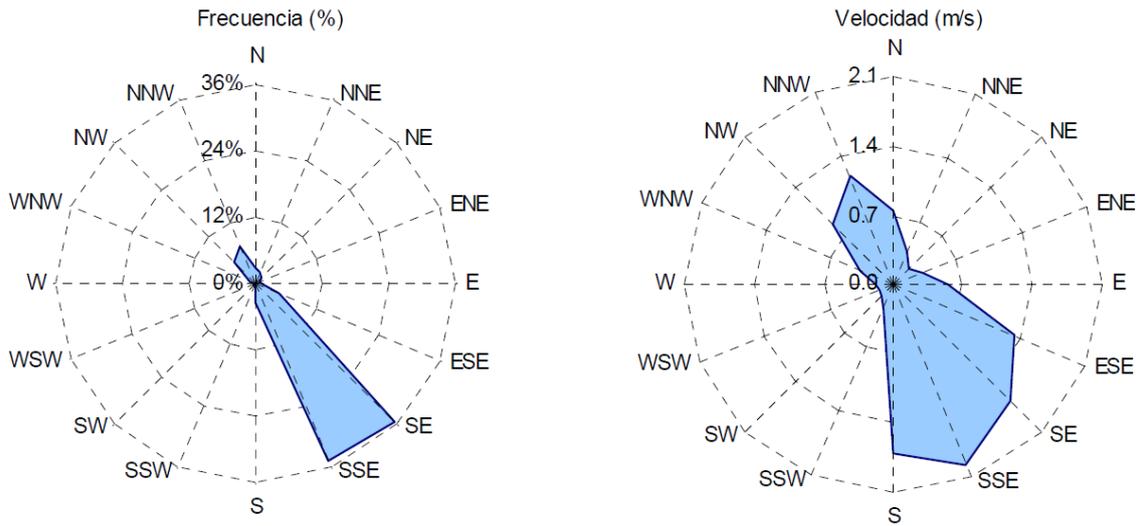


Figura 34. Rosa de direcciones medias de viento y rosa de velocidad media del viento a 10 m de altura durante el periodo de referencia. Estación 95003.

Fuente: Autor

1.4. Estación 95004__ CARIAMANGA (10 m)

Durante el periodo de referencia esta estación contiene 7279 datos filtrados registrados a 10 m, con una velocidad media de 0.35 m/s.

En la siguiente figura se muestra la distribución de frecuencias de viento por intervalos de velocidad a 10m de altura. También se muestra la curva de duración del viento que representa la frecuencia de vientos con velocidades por encima de un determinado valor.

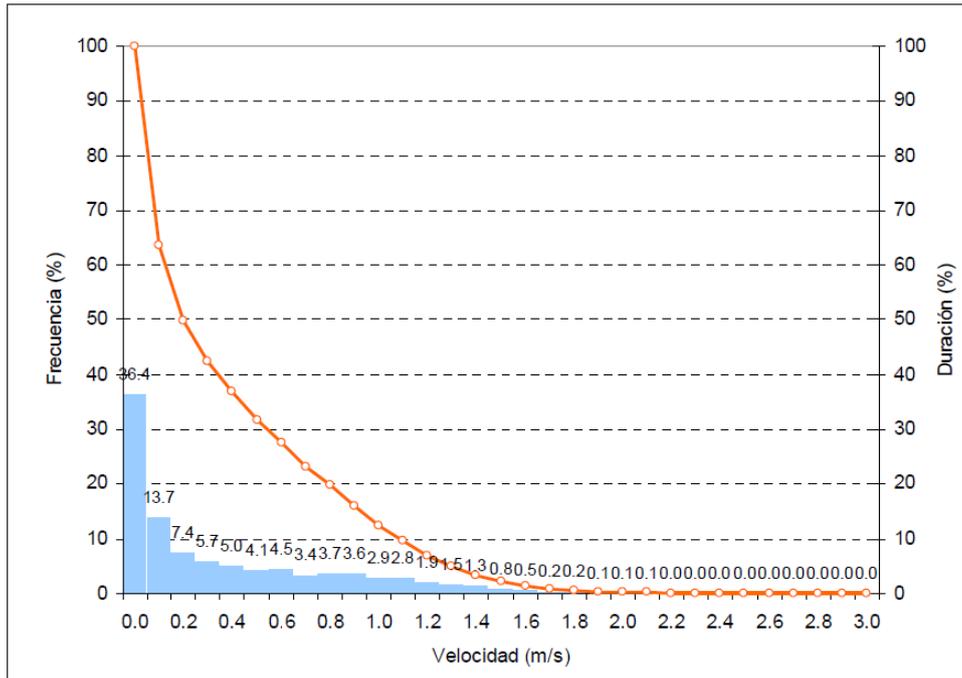


Figura 35. Frecuencia de viento por intervalos de velocidad y curva de duración del viento en la estación 95004 a 10 m de altura de medida.

Fuente: Autor

Los parámetros de la distribución de Weibull a los que se ajustan la serie de registros de viento, corresponden a un factor de escala (A) de 0.4 m/s, y un factor de forma (k) de 0.95. A continuación se representan la rosa de frecuencias y la rosa de velocidad correspondiente al periodo de referencia de la estación caracterizada.

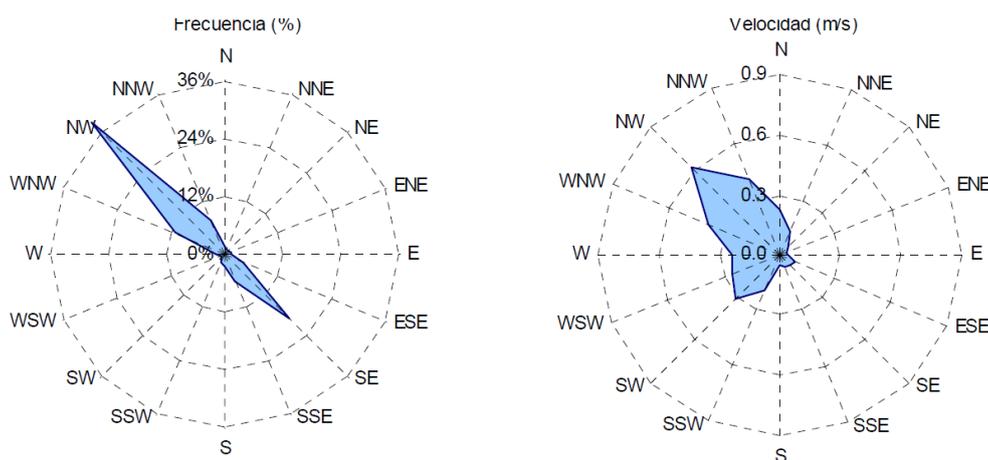


Figura 36. Rosa de direcciones medias de viento y rosa de velocidad media del viento a 10 m de altura durante el periodo de referencia. Estación 95004.

Fuente: Autor

1. 5. Estación 95005__ EL ALMENDRAL (10 m)

Durante el periodo de referencia esta estación contiene 7599 datos filtrados registrados a 10 m, con una velocidad media de 0.57 m/s.

En la siguiente figura se muestra la distribución de frecuencias de viento por intervalos de velocidad a 10m de altura. También se muestra la curva de duración del viento que representa la frecuencia de vientos con velocidades por encima de un determinado valor.

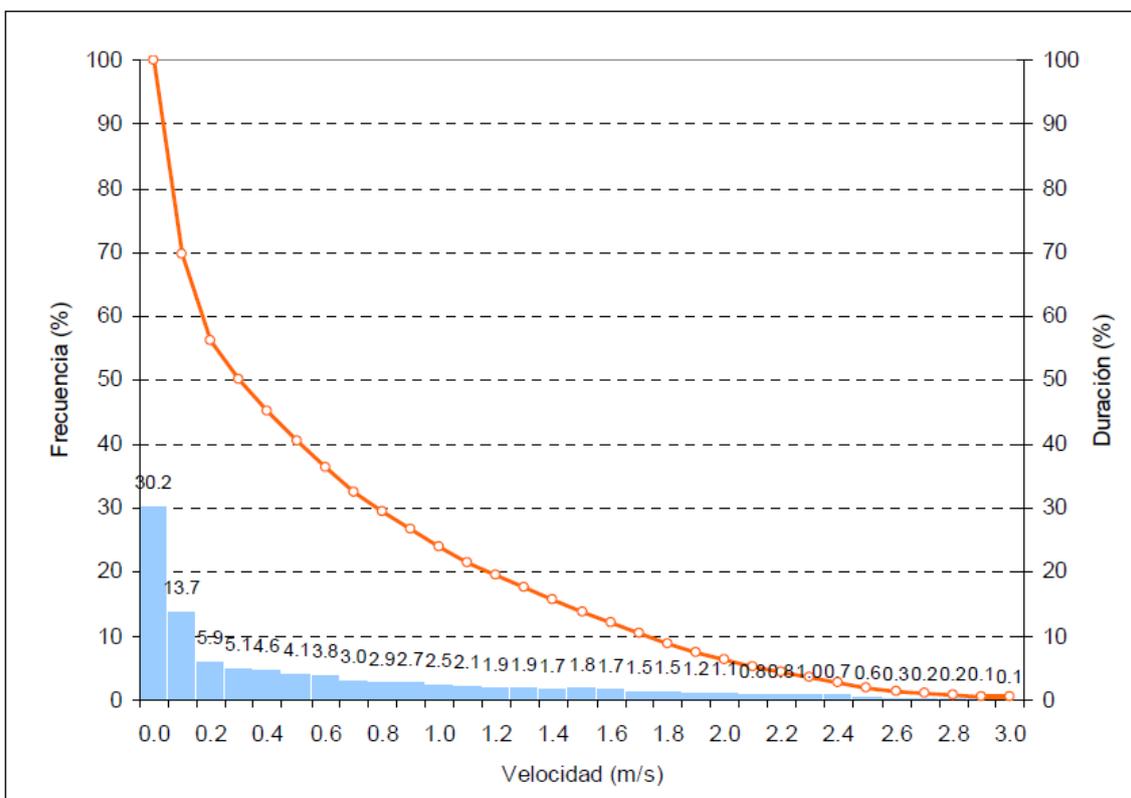


Figura 37. Frecuencia de viento por intervalos de velocidad y curva de duración del viento en la estación 95005 a 10 m de altura de medida.

Fuente: Autor

Los parámetros de la distribución de Weibull a los que se ajustan la serie de registros de viento, corresponden a un factor de escala (A) de 0.6 m/s, y un factor de forma (k) de 0.91.

A continuación se representan la rosa de frecuencias y la rosa de velocidad correspondiente al periodo de referencia de la estación caracterizada.

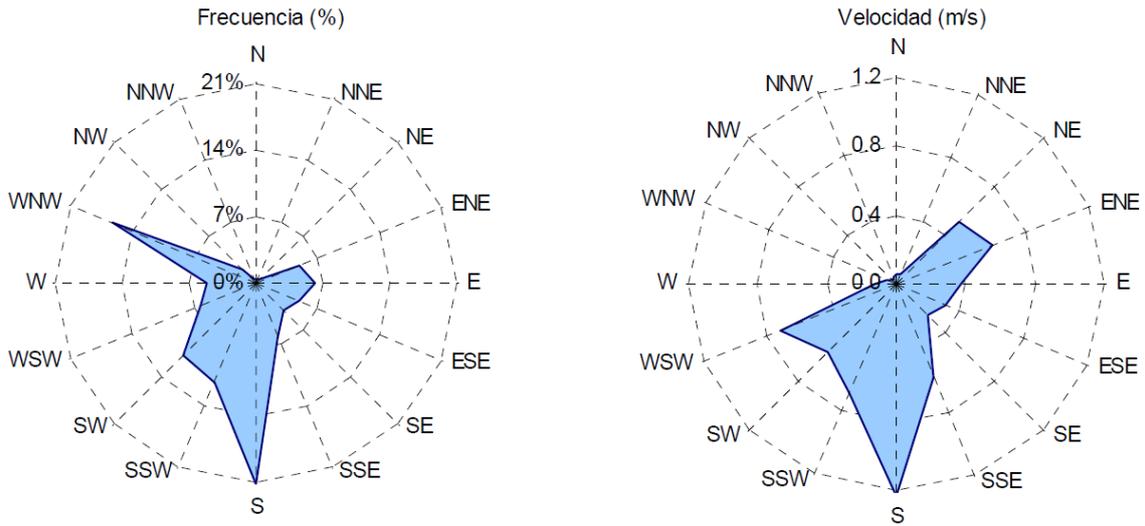


Figura 38. Rosa de direcciones medias de viento y rosa de velocidad media del viento a 10 m de altura durante el periodo de referencia. Estación 95005.

Fuente: Autor

1.6. Estación 95006__YANGANA (10 m)

Durante el periodo de referencia esta estación contiene 6872 datos filtrados registrados a 10 m, con una velocidad media de 0.27 m/s.

En la siguiente figura se muestra la distribución de frecuencias de viento por intervalos de velocidad a 10m de altura. También se muestra la curva de duración del viento que representa la frecuencia de vientos con velocidades por encima de un determinado valor.

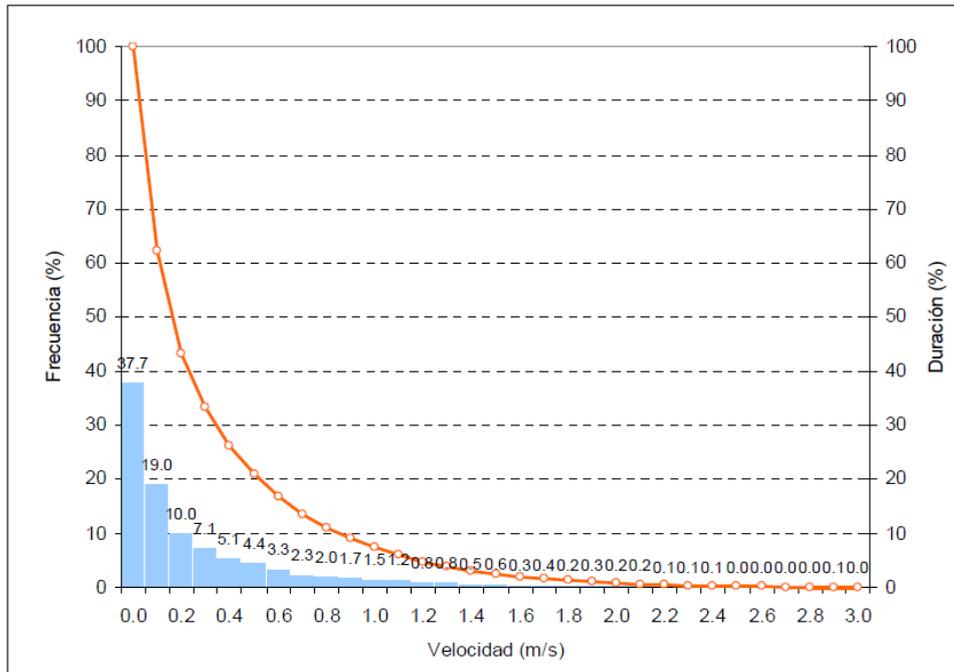


Figura 39. Frecuencia de viento por intervalos de velocidad y curva de duración del viento en la estación 95006 a 10 m de altura de medida.

Fuente: Autor

Los parámetros de la distribución de Weibull a los que se ajustan la serie de registros de viento, corresponden a un factor de escala (A) de 0.2 m/s, y un factor de forma (k) de 0.74. A continuación se representan la rosa de frecuencias y la rosa de velocidad correspondiente al periodo de referencia de la estación caracterizada.

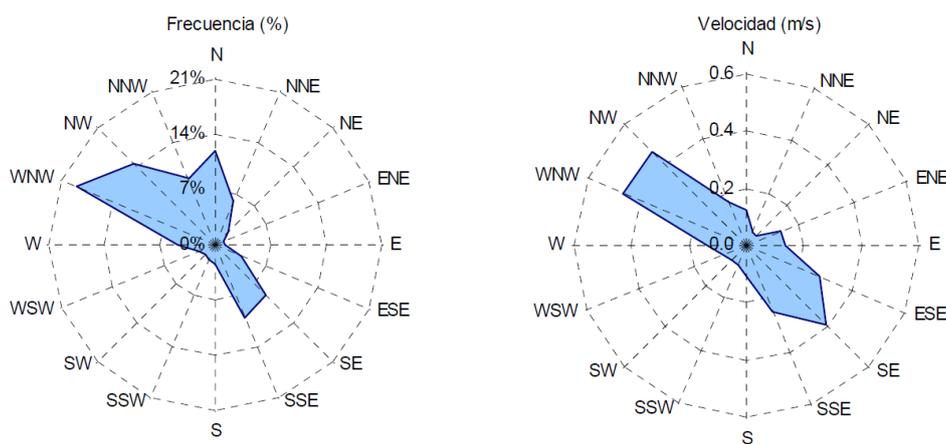


Figura 40. Rosa de direcciones medias de viento y rosa de velocidad media del viento a 10 m de altura durante el periodo de referencia. Estación 95006.

1.7. Estación 95007__ ZAPOTILLO (10 m)

Durante el periodo de referencia esta estación contiene 7036 datos filtrados registrados a 10 m, con una velocidad media de 0.87 m/s.

En la siguiente figura se muestra la distribución de frecuencias de viento por intervalos de velocidad a 10m de altura. También se muestra la curva de duración del viento que representa la frecuencia de vientos con velocidades por encima de un determinado valor.

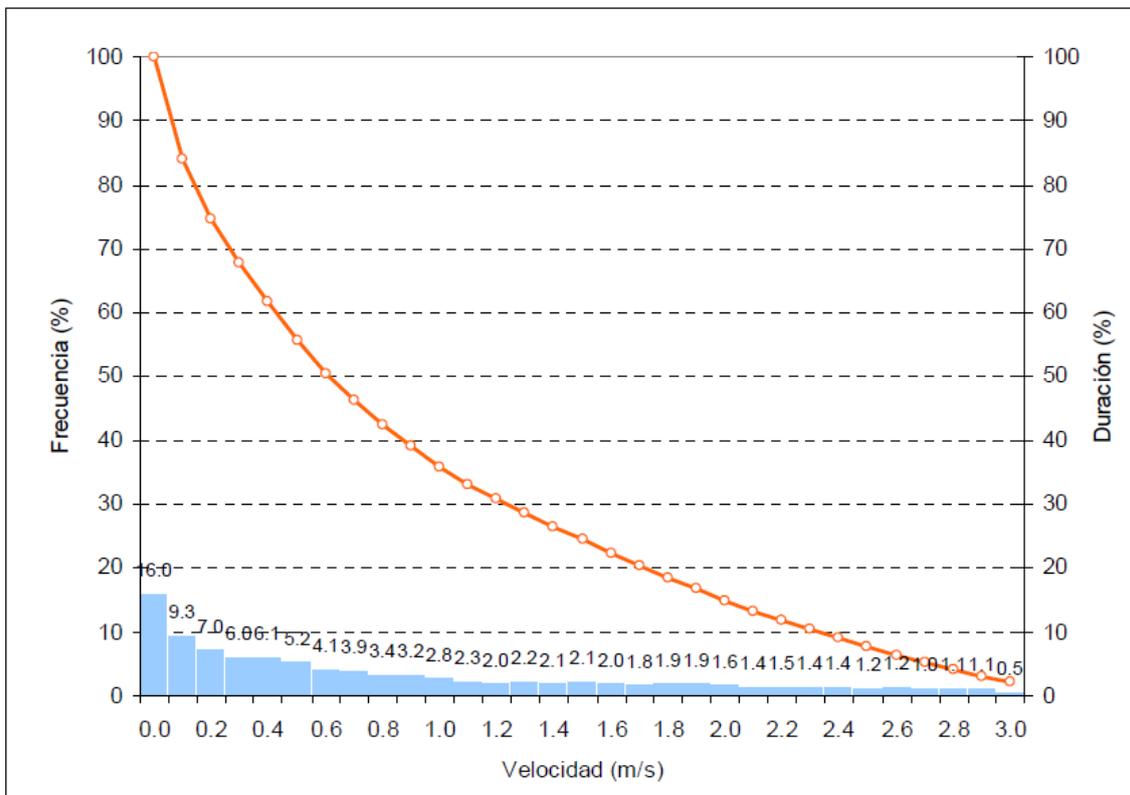


Figura 41. Frecuencia de viento por intervalos de velocidad y curva de duración del viento en la estación 95007 a 10 m de altura de medida.

Fuente: Autor

Los parámetros de la distribución de Weibull a los que se ajustan la serie de registros de viento, corresponden a un factor de escala (A) de 0.9 m/s, y un factor de forma (k) de 1.09.

A continuación se representan la rosa de frecuencias y la rosa de velocidad correspondiente al periodo de referencia de la estación caracterizada.

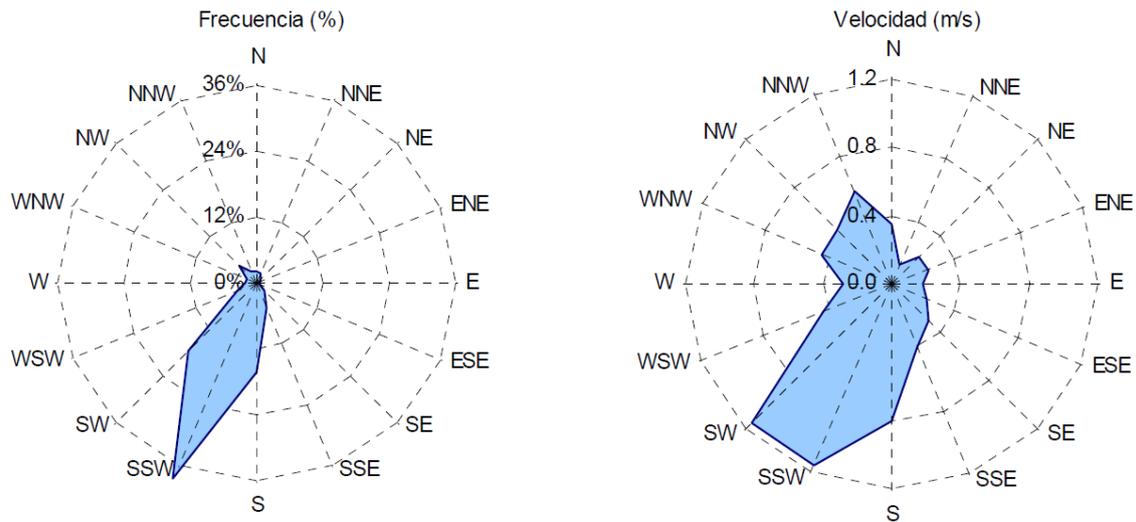


Figura 42. Rosa de direcciones medias de viento y rosa de velocidad media del viento a 10 m de altura durante el periodo de referencia. Estación 95007.

Fuente: Autor

1.8. Estación 95008__ QUILANGA (10 m)

Durante el periodo de referencia esta estación contiene 8277 datos filtrados registrados a 10 m, con una velocidad media de 1.05 m/s.

En la siguiente figura se muestra la distribución de frecuencias de viento por intervalos de velocidad a 10m de altura. También se muestra la curva de duración del viento que representa la frecuencia de vientos con velocidades por encima de un determinado valor.

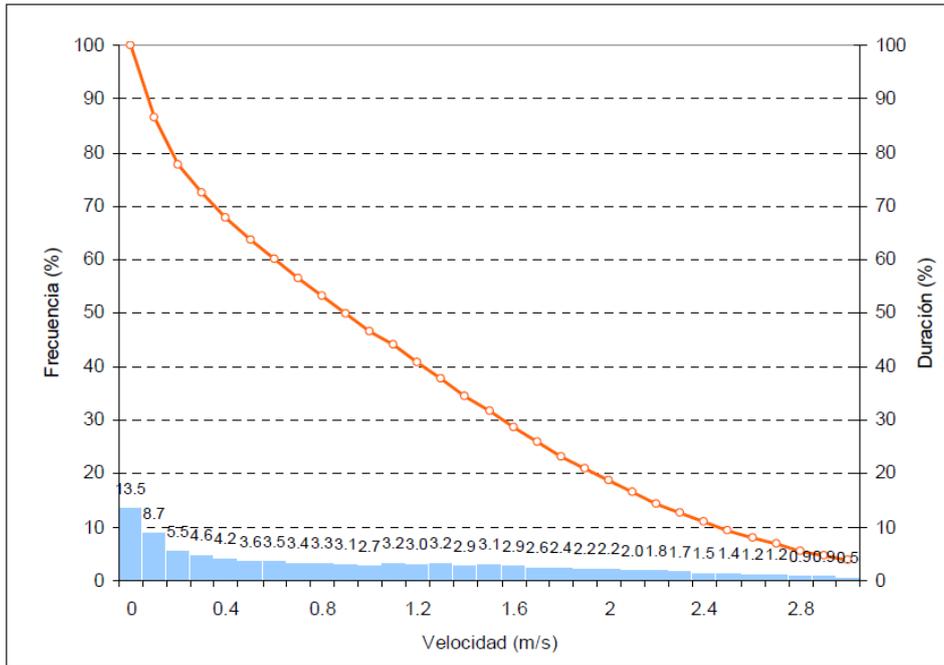


Figura 43. Frecuencia de viento por intervalos de velocidad y curva de duración del viento en la estación 95008 a 10 m de altura de medida.

Fuente: Autor

Los parámetros de la distribución de Weibull a los que se ajustan la serie de registros de viento, corresponden a un factor de escala (A) de 1.2 m/s, y un factor de forma (k) de 1.31. A continuación se representan la rosa de frecuencias y la rosa de velocidad correspondiente al periodo de referencia de la estación caracterizada.

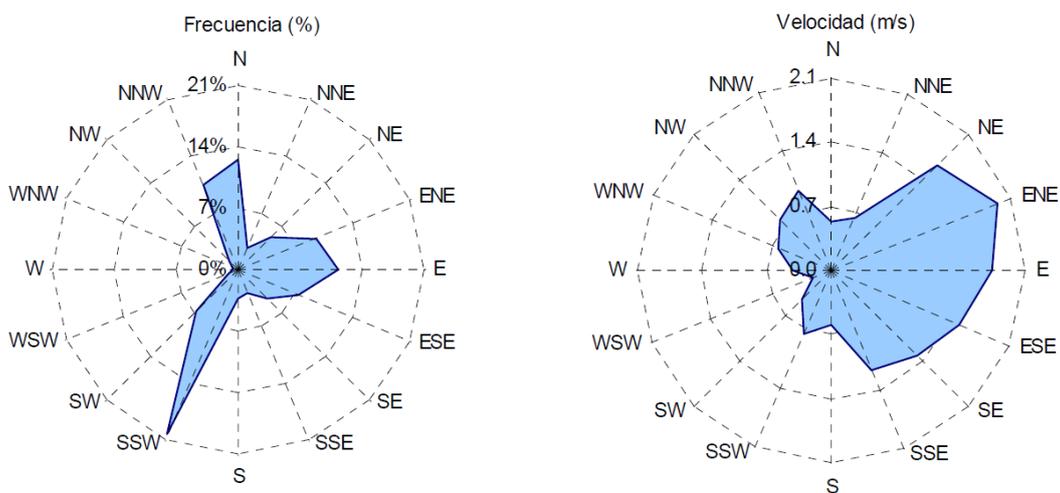


Figura 44. Rosa de direcciones medias de viento y rosa de velocidad media del viento a 10 m de altura durante el periodo de referencia. Estación 95008.

Fuente: Autor

1.9. Estación 95009__ AMALUZA (10 m)

Durante el periodo de referencia esta estación contiene 4256 datos filtrados registrados a 10 m, con una velocidad media de 0.49 m/s.

En la siguiente figura se muestra la distribución de frecuencias de viento por intervalos de velocidad a 10m de altura. También se muestra la curva de duración del viento que representa la frecuencia de vientos con velocidades por encima de un determinado valor.

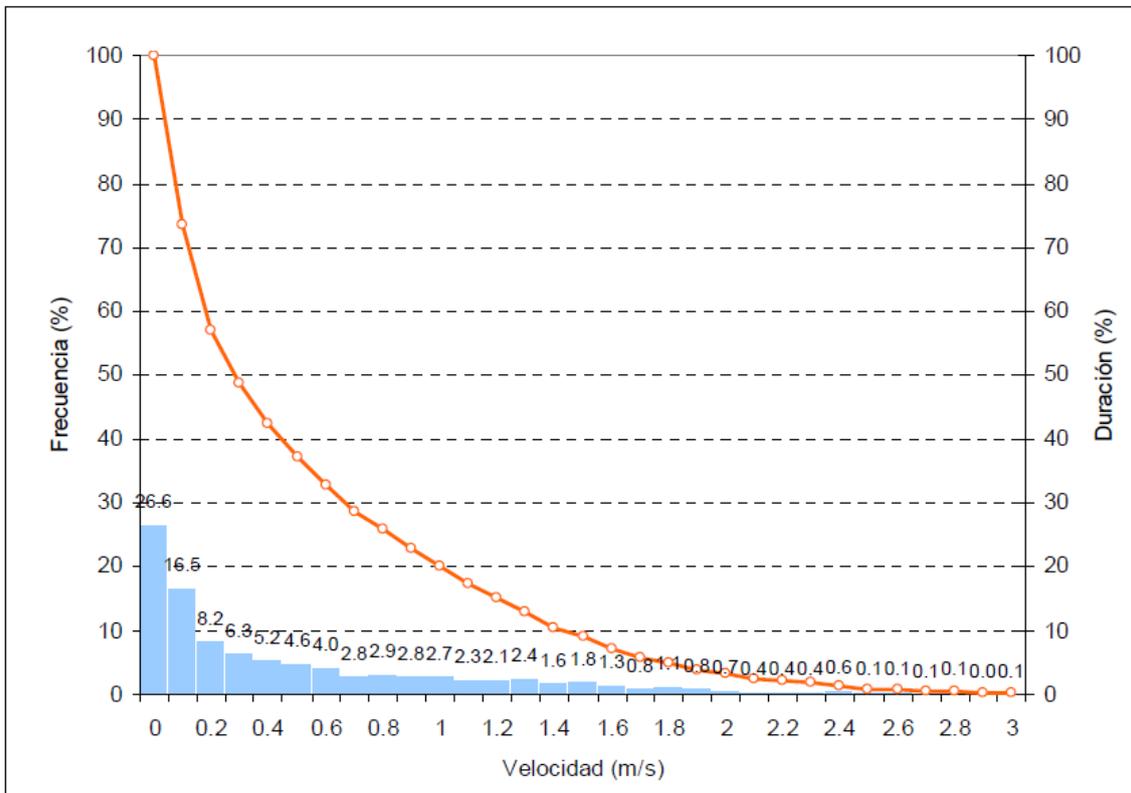


Figura 45. Frecuencia de viento por intervalos de velocidad y curva de duración del viento en la estación 95009 a 10 m de altura de medida.

Fuente: Autor

Los parámetros de la distribución de Weibull a los que se ajustan la serie de registros de viento, corresponden a un factor de escala (A) de 0.5 m/s, y un factor de forma (k) de 0.90.

A continuación se representan la rosa de frecuencias y la rosa de velocidad correspondiente al periodo de referencia de la estación caracterizada.

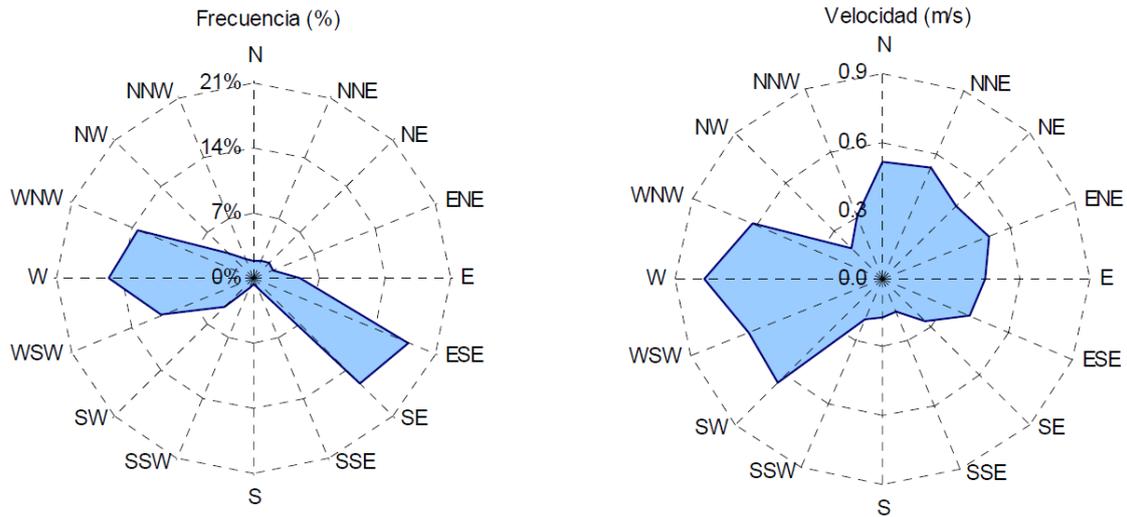


Figura 46. Rosa de direcciones medias de viento y rosa de velocidad media del viento a 10 m de altura durante el periodo de referencia. Estación 95009.

Fuente: Autor

1.10. Estación 95010__ EL INGENIO (10 m)

Durante el periodo de referencia esta estación contiene 7915 datos filtrados registrados a 10 m, con una velocidad media de 0.19 m/s.

En la siguiente figura se muestra la distribución de frecuencias de viento por intervalos de velocidad a 10m de altura. También se muestra la curva de duración del viento que representa la frecuencia de vientos con velocidades por encima de un determinado valor.

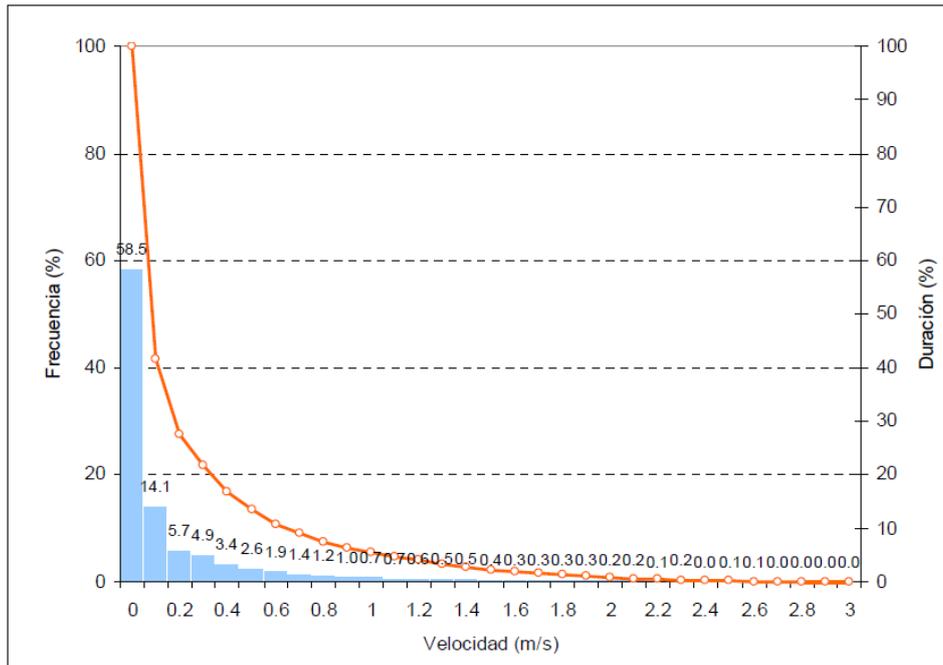


Figura 47. Frecuencia de viento por intervalos de velocidad y curva de duración del viento en la estación 95010 a 10 m de altura de medida.

Fuente: Autor

Los parámetros de la distribución de Weibull a los que se ajustan la serie de registros de viento, corresponden a un factor de escala (A) de 0.1 m/s, y un factor de forma (k) de 0.58. A continuación se representan la rosa de frecuencias y la rosa de velocidad correspondiente al periodo de referencia de la estación caracterizada.

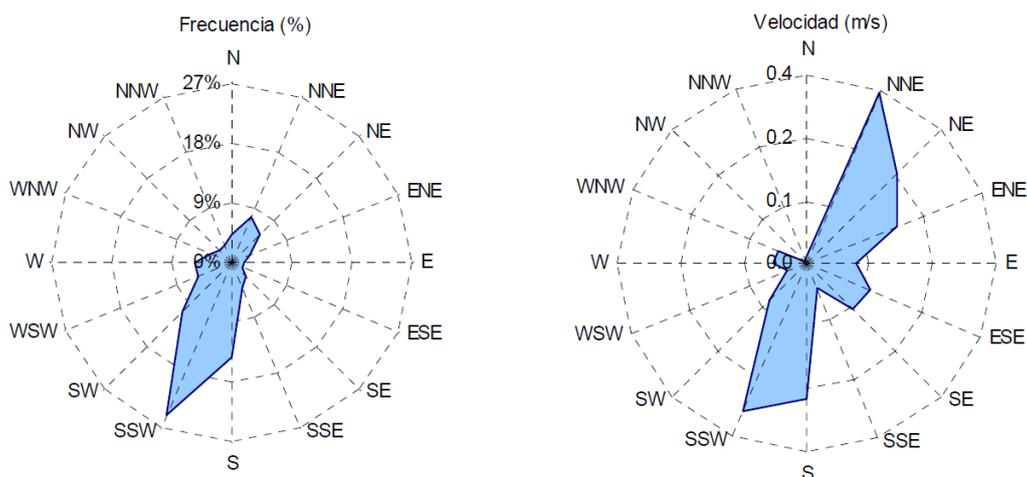


Figura 48. Rosa de direcciones medias de viento y rosa de velocidad media del viento a 10 m de altura durante el periodo de referencia. Estación 95010.

Fuente: Autor

A modo de conclusión del presente apartado, hay que destacar la baja velocidad medida obtenida durante el periodo de referencia en todas las estaciones. Esto puede ser debido a la configuración de las torres o afecciones de tipo orográfico o de otra índole que puedan tener influencia sobre los datos medidos.

El hecho de que no se disponga de información relativa a la configuración de las torres, unido al bajo periodo de medida (1 año), a que los datos son horarios y que están medidos a una altura cercana al suelo, hace que la incertidumbre asociada a los datos sea elevada.

Con el objeto de no aumentar las incertidumbres en el estudio y debido a la baja disponibilidad de los datos en las estaciones 950001_Vilcabamba, 950006_Changaimina y 950009_Amaluza se han descartado para llevar a cabo la modelización.

Asimismo se ha descartado la estación 950010_El Ingenio, ya que presenta la velocidad más baja comparada con el resto de las estaciones, lo que hace que no sea fiable el uso de sus datos en la modelización del campo de vientos.

2. PERFIL VERTICAL DE VIENTO

Las estaciones del emplazamiento disponen de datos a una sola altura de medida por lo que no ha sido posible obtener el perfil vertical con los datos medidos en ellas.

No obstante se ha podido estimar el valor de este perfil de forma teórica a partir de los valores de velocidad obtenidos por el programa WAsP a 10 y 80 m de altura asumiendo la variación del viento con la altura, resolviendo las ecuaciones 2 y 3, del apartado d.2.3.1. (página 20).

A continuación se muestran los valores de los perfiles verticales despejando el exponente de la ley potencial de las fórmulas antes mencionadas, obtenidos a partir del modelo.

Tabla 12. Velocidad media medida durante el periodo de referencia y perfil vertical y velocidad a 80 m estimada por WAsP.

Estación	V(10m)	Perfil vertical	V(80m)
95002_Chquiribamba	0.81	0.393	1.83
95003_Yangana	1.55	0.156	2.14
95004_Cariamanga	0.35	0.649	1.35
95005_El Almendral	0.57	0.420	1.37
95007_Zapotillo	0.87	0.215	1.36
95008_Quilanga	1.05	0.314	2.02

Fuente: Autor

Debido a que la altura a la que se han medido los datos de viento en las estaciones meteorológicas (10 metros), no coincide con la altura a la que se desea obtener los resultados (80 m) se ha dejado al modelo WAsP que extrapole hasta dicha altura con el perfil indicado anteriormente para cada estación.

El hecho de no poder estimar un perfil vertical con datos medidos en las estaciones hace que se incremente la incertidumbre.

En este punto y con el objeto de no aumentar dichas incertidumbres, se ha decidido destacar la estación 950004_Cariamanga de la modelización debido al alto valor del perfil vertical estimado por el modelo ya que no parece fiable al compararlo con los valores obtenidos por estaciones cercanas.

3. MODELIZACIÓN

La obtención del mapa eólico de la provincia de Loja, se ha efectuado simulando el campo de vientos del emplazamiento con el modelo WAsP (Wind Atlas Analysis and Application Program - versión 10.1) desarrollado por el Risø National Laboratory de Dinamarca, y que fue utilizado en la elaboración del Atlas Eólico Europeo.

3.1. DATOS DE ENTRADA DEL MODELO

Para determinar el potencial eólico del emplazamiento con el modelo, es necesario introducir una serie de datos iniciales en el programa. Estos datos se describen en los siguientes apartados.

3.2. DATOS METEOROLÓGICOS

Para que el programa WAsP simule las condiciones de viento en el emplazamiento es necesario introducirle los datos medidos en las estaciones meteorológicas ubicadas en el emplazamiento.

De este modo se han tenido en cuenta los datos horarios filtrados durante el periodo de referencia a la altura de medida de 10 m, de cinco de las estaciones con las que se contaba inicialmente que son: 95002_Chquiribamba, 95003_Yangana, 950005_El Almendral, 950007_Zapotilo y 95008__Quilanga. Se ha dejado que WAsP extrapole de forma vertical hasta la altura de 80 m.

Además debido a que los programas de simulación introducen una serie de errores en los resultados que ofrecen, el modelo WAsP ha sido calibrado en la posición de cada torre y se han introducido los factores correctores pertinentes antes de la simulación con el objeto de disponer de un resultado corregido.

3.3. DATOS TOPOGRÁFICOS

Se ha obtenido el mapa topográfico digitalizado de toda la provincia de Loja, con las correspondiente curvas de nivel cada 50 metros y cada 10 m en un entorno de 10 km para cada estación de medida, a partir de la información perteneciente al Shuttle Radar Topography Mision de la NASA.

Por otro lado se ha definido un mapa de rugosidad, elaborado a partir de fotografías por satélite obtenidas de Gogle Earth con una resolución 1:10000, con el objeto de simular en el modelo la posible influencia de la vegetación.

Se han definido las curvas de rugosidad en áreas cercanas a las estaciones tomado un valor exterior de rugosidad de 0.03 m y valores interiores de 0.1 m (curvas verdes), 0.2 m (curvas azules) y 0.33 m (curvas naranjas).

En la siguiente figura se puede ver el mapa de curvas de nivel cada 100 m con las curvas de rugosidad consideradas, así como la ubicación de las estaciones de medida usadas en la modelización.

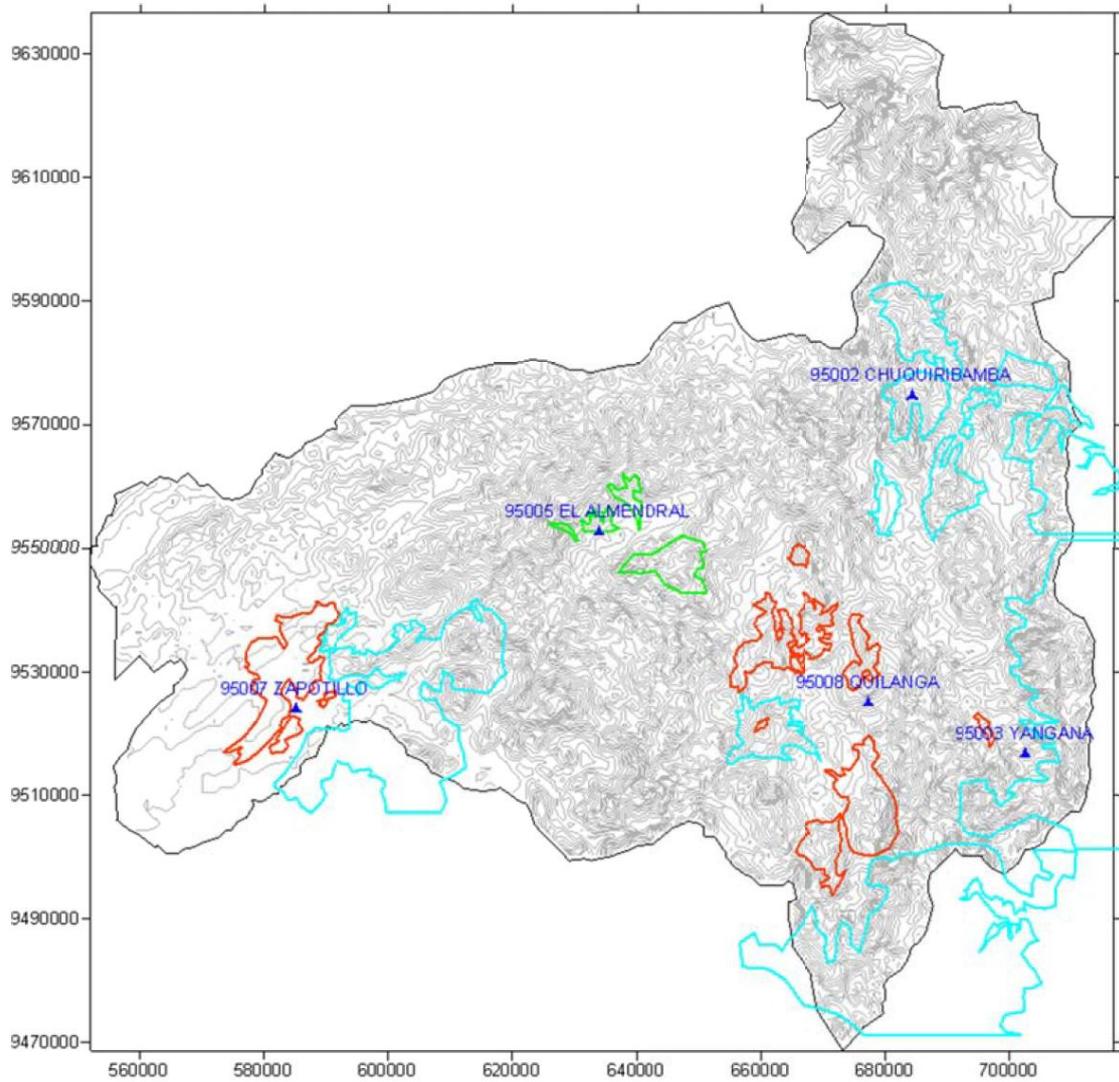


Figura 49. Mapa de 2D con las curvas de nivel y rugosidad y las estaciones usadas en la modelización
Fuente: Autor

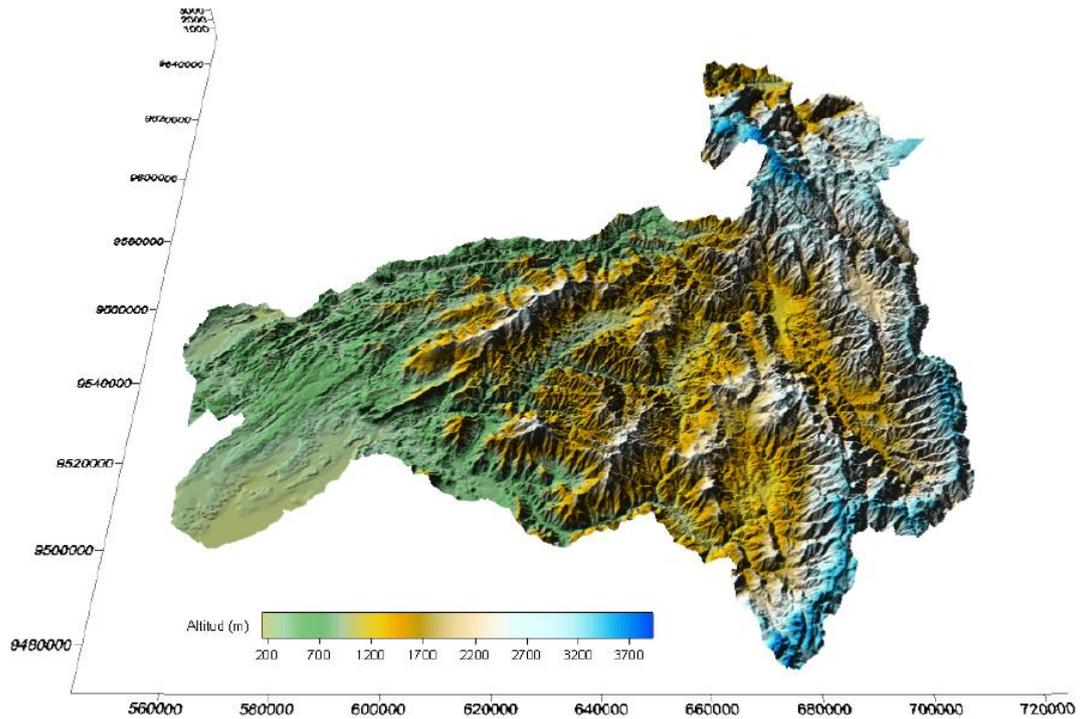


Figura 50. Representación en 3D de la provincia de Loja.
Fuente: Autor

3.4. MALLA DE CÁLCULO

Con el objeto de obtener los resultados en un mallado regular de resolución 1 km se han definido dos regiones debido a limitaciones del modelo a la hora de la simulación.

De esta forma se han calculado dos mallados con un área de solapamiento de 5 km de ancho. A continuación se puede ver el mapa del emplazamiento con las curva de nivel, la posición de las estaciones de medida y los mallados calculados con su extensión.

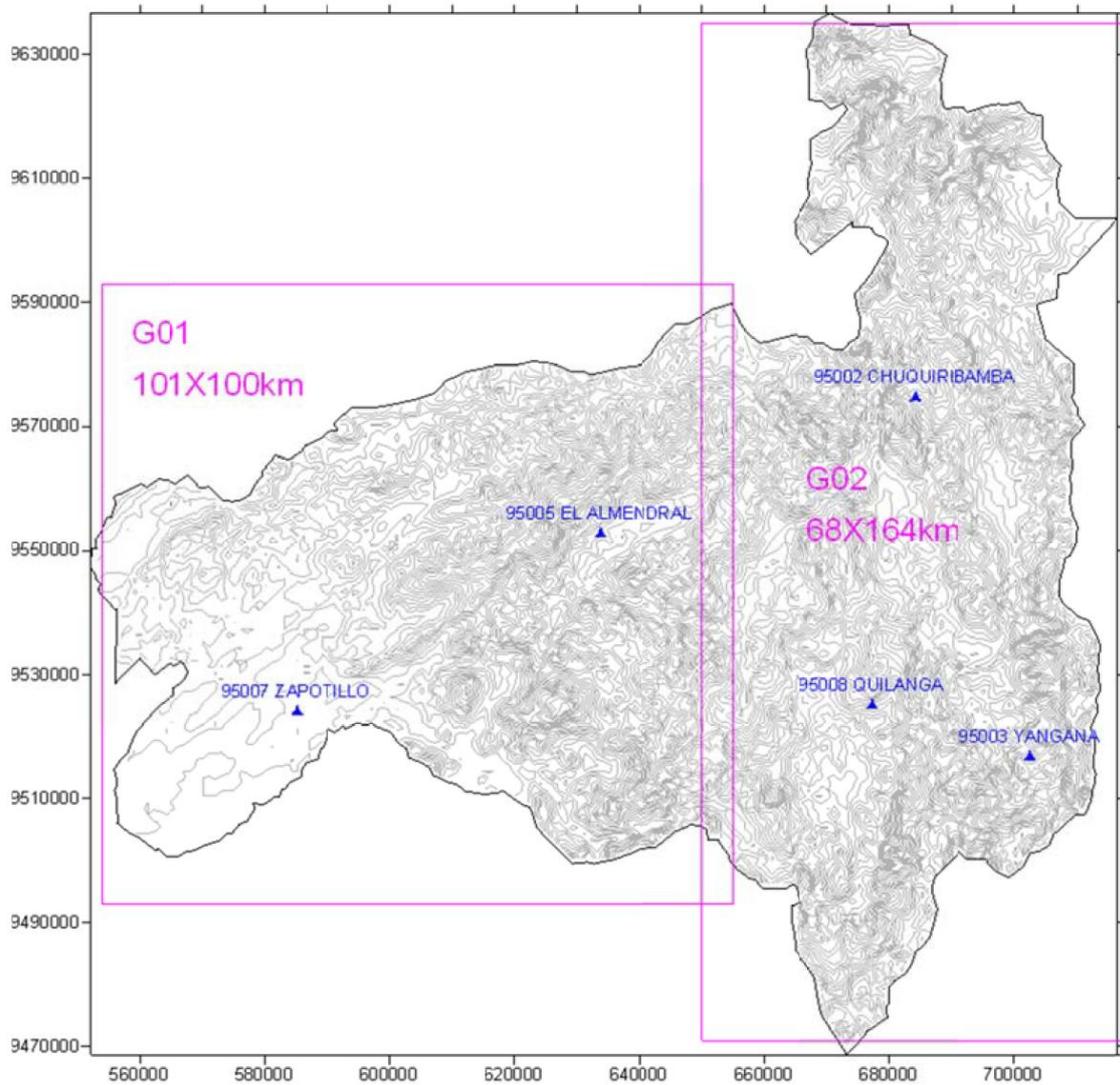


Figura 51. Mapa con las curvas de nivel, la ubicación de las estaciones meteorológicas y la extensión de los mallados

Fuente: Autor

Estas dos áreas malladas se han simulado con los datos de las 5 estaciones de medida usadas en la simulación.

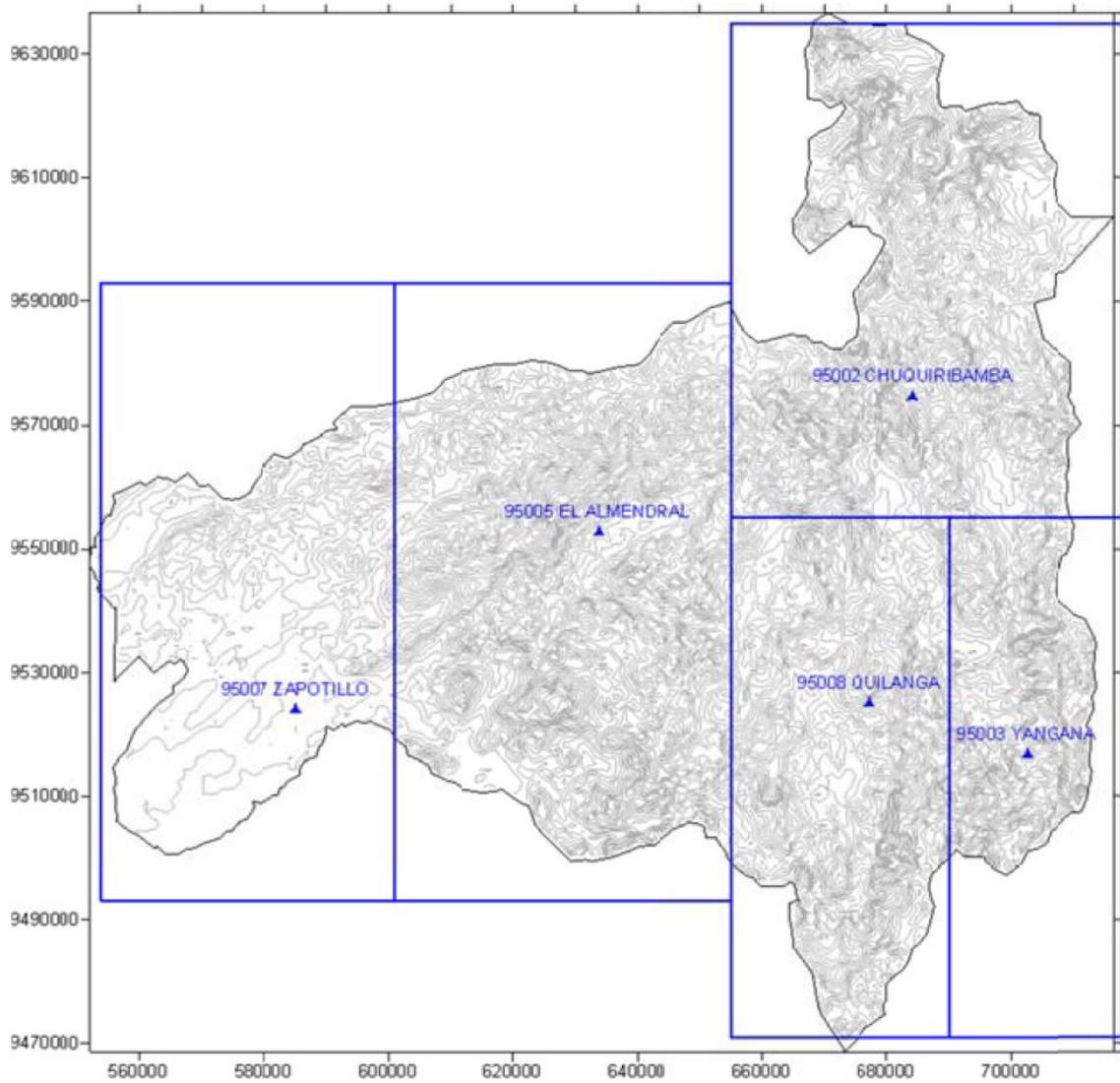


Figura 52. Mapa con las áreas de asignación de resultados según la torre más representativa
Fuente: *Autor*

3.5. RESULTADO DE LA MODELIZACIÓN

Después de introducir las variables en el software WAsP, se ha obtenido como resultado:

- Un archivo en formato excel, con una resolución horizontal de 1km a 80 metros de altura, que cubre toda la provincia de Loja, en donde se incluyen las siguientes variables:
 - Velocidad media
 - Rosa de direcciones (considerando 16 sectores de ancho 22.5°)
 - Coeficientes A y k de la distribución Weibull.
 - Densidad de Potencia.

Este archivo, es presentado en formato digital, debido a que no es posible su impresión. Introduciendo los datos en el IDRISI (SIG utilizado en el presente proyecto), se obtiene, de forma gráfica, el resultado global del mapa eólico de la provincia de Loja a 80 m de altura, con los datos de las estaciones utilizadas en este proyecto.

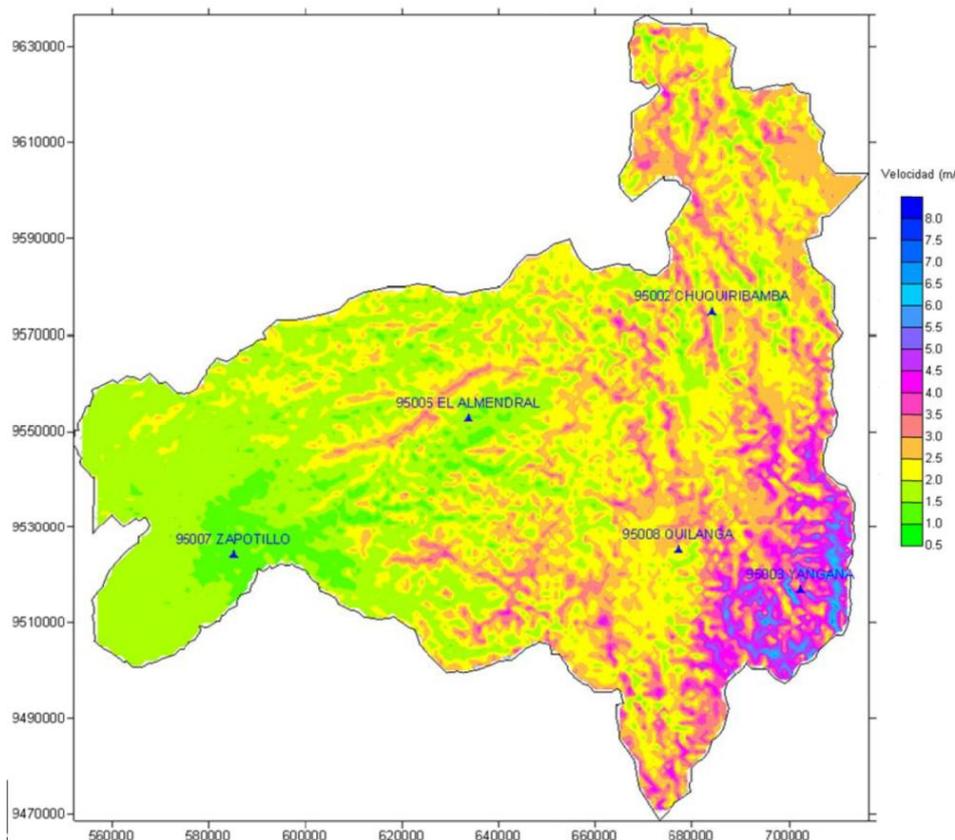


Figura 53. Mapa de isoventas a 80 m de altura de la provincia de Loja.

Fuente: Autor

Se puede comparar, el mapa de la figura 53, con el modelo WRF (Weather Research and Forecasting) a partir de los datos satelitales.

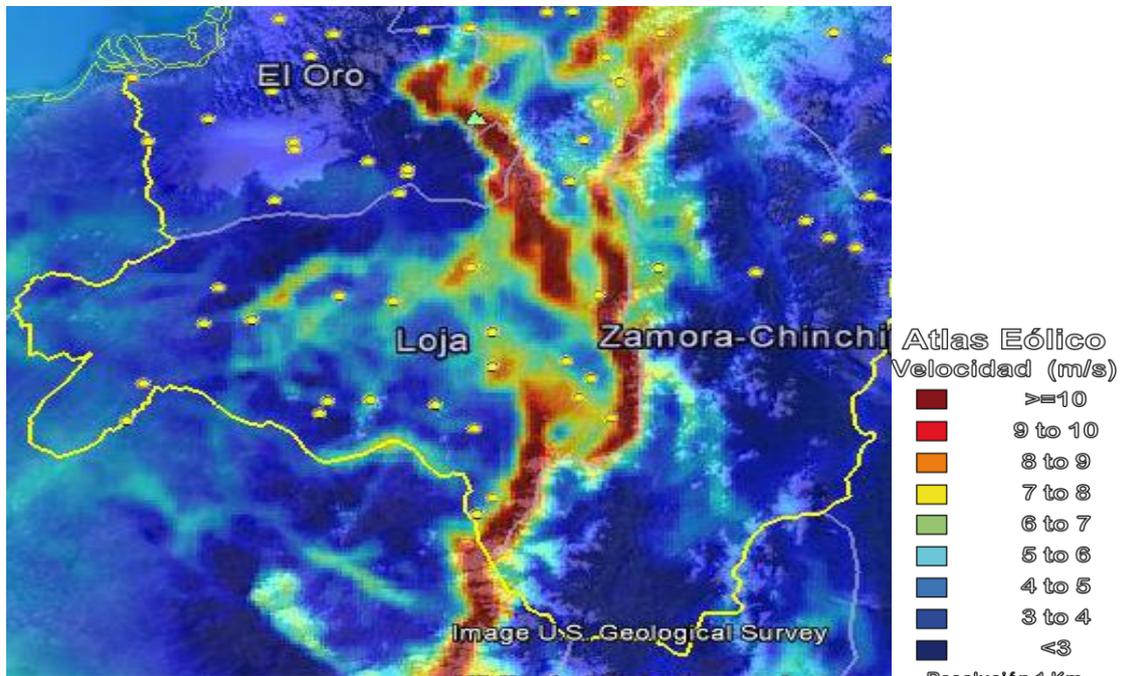


Figura 54. Velocidad promedio anual, con resolución de 1 km a 80 metros de altura.

Fuente: Juan Peralta, investigador.

En el Anexo III, se mostrarán todos los mapas generados en el software IDRISI con los datos del modelo (velocidad media, densidad de potencia y sectores de la rosa de frecuencias).

En el Anexo IV, se muestra el procedimiento de cálculo en WAsP, y se describe detalladamente con capturas de pantalla los pasos a seguir en la modelización.

g.- DISCUSIÓN

En el presente apartado, se realiza una discusión, sobre los resultados finales alcanzados, en base a los objetivos específicos del proyecto de tesis.

1. Se realizó un análisis minucioso de 10 estaciones meteorológicas automáticas ubicadas en la provincia de Loja, llegando a las siguiente discusión:

- Se tiene baja velocidad medida, obtenida durante el periodo de referencia en todas las estaciones. Esto puede ser debido a la configuración de las torres o afecciones de tipo orográfico o de otra índole que puedan tener influencia sobre los datos medidos.
- No se dispone de información relativa a la configuración de las torres, unido al bajo periodo de medida (1 año), a que los datos son horarios y que están medidos a una altura cercana al suelo, hace que la incertidumbre asociada a los datos sea elevada.
- Con el objeto de no aumentar las incertidumbres en el estudio y debido a la baja disponibilidad de los datos en las estaciones 950001_Vilcabamba, 950006_Changaimina y 950009_Amaluza se han descartado para llevar a cabo la modelización.
- Se ha descartado la estación 950010_El Ingenio, ya que presenta la velocidad más baja comparada con el resto de las estaciones, lo que hace que no sea fiable el uso de sus datos en la modelización del campo de vientos.
- Se ha decidido destacar la estación 950004_Cariamanga de la modelización debido al alto valor del perfil vertical estimado por el modelo, ya que no parece fiable al compararlo con los valores obtenidos por estaciones cercanas.

2. Se ha realizado un mallado de la provincia de Loja, y realizado el modelo con el software WASP, con una resolución horizontal de 1 km para obtener en cada nodo de la malla las siguientes variables:

- Velocidad media
- Coeficientes A y k de la distribución de Weibull.
- Densidad de potencia.
- Rosa de frecuencia con 16 sectores.

3. Los resultados de las variables anteriormente descritas, se han obtenido a partir de las 5 estaciones usadas para la modelización, de modo que con el objeto de tener un resultado global para cada nodo se han tenido en cuenta las siguientes consideraciones:
- La velocidad media y la densidad de potencia se han calculado ponderando los resultados obtenidos a partir de todas las estaciones por el inverso de las distancias al cuadrado.
 - El coeficiente k de la distribución de Weibull y la rosa de frecuencia en cada nodo se ha obtenido realizando una asignación a los valores obtenidos por cada estación, teniendo en cuenta la más representativa en términos de proximidad como se puede observó en la figura 26.
 - Los valores del coeficiente A , han sido recalculados a partir de la velocidad media y del coeficiente k .
 - Los resultados presentados llevan asociada una elevada incertidumbre debido por un lado a la campaña de medida de las estaciones (configuración, calibración de sensores, datos horarios, periodo de medida de un año, altura de medida cercana al suelo, imposibilidad de medir un perfil vertical) y por otro a la gran extensión del área a simular.
4. Se ha elaborado, y utilizado una metodología, que servirá para realizar el mismo procedimiento en las provincias de El Oro, y de Zamora Chinchipe, y así poder obtener el mapa eólico de toda la Región Sur del Ecuador. Esta metodología, presentada en el apartado “e. Materiales y Métodos”, se resume en los siguientes puntos:
- Obtener los datos de partida.
 - Realizar una campaña de medidas de viento.
 - Organizar y analizar los datos de las estaciones de medida.
 - Determinar las velocidades medias mensuales
 - Elección y caracterización del periodo de referencia
 - Obtener el perfil vertical de viento
 - Obtener los datos topográficos de la región (capas cartográficas de altitud y de rugosidad)
 - Realizar la modelización.

h.- CONCLUSIONES

- Una de las principales características del viento, es la variabilidad anual, estacional y diaria. Esto significa que la velocidad media del viento puede oscilar de un año a otro, y por lo tanto también variará el recurso eólico de un determinado sitio. Es importante señalar, que los datos utilizados, corresponden a un solo año calendario (enero – diciembre de 2010), siendo ésta, una debilidad encontrada en la realización del proyecto, debido a que no se dispone de una serie de años enteros de medidas del viento, que darían mayor confiabilidad a los resultados presentados.
- Los datos que se utilizaron en la realización del presente trabajo, corresponden a 10 estaciones meteorológicas automáticas, instaladas en distintos lugares de la provincia de Loja. Debido a la baja disponibilidad espacial y temporal de los datos, se han realizado correlaciones de valores de velocidad tanto horarios como diarios, que permitan una regeneración significativa de la información.
- Se ha elaborado un modelo del potencial eólico en la Provincia de Loja, utilizando el software WAsP. Este modelo, lleva asociada una elevada incertidumbre, debido por un lado a la campaña de medida de las estaciones (configuración, calibración de sensores, datos horarios, periodo de medida de una año, altura cercana al suelo, imposibilidad de medir un perfil vertical, etc.) y por otro a la gran extensión del área a simular. Sin embargo, la metodología presentada, es confiable, siendo utilizada incluso para elaborar mapas eólicos en Europa.
- A manera de hipótesis, se puede decir, que utilizando la misma metodología del presente informe, se podría mejorar de manera significativa la confiabilidad y reducir la incertidumbre, si se utilizara datos de un número mayor de años; y, además se aumentara el número de sensores a lo largo de toda la provincia de Loja. Este hecho, será posible comprobar, dentro de poco tiempo, ya que se está consiguiendo datos minutales de las 10 estaciones de referencia, transmitidos en tiempo real. Así mismo, dentro del proyecto de investigación (SENESCYT 754), se instalarán en el año 2013, 5 estaciones automáticas de última generación en lugares estratégicos de la provincia de Loja.

- Los resultados de WAsP fueron importados en Idrisi Selva para visualización cartográfica, elaboración de mapas y a futuro utilización en varios análisis espaciales con otros datos del SIG (por ejemplo, evaluación multicriterios para ubicar los sitios más apropiados). La Universidad Nacional de Loja tiene la licencia del software, no obstante, se puede utilizar cualquier otro SIG del mercado para la elaboración de los mapas.
- El potencial eólico en la provincia de Loja con fines de generación eléctrica, comparado con las demás provincias del Ecuador, es el mejor, llegando hasta 880.19 MW de potencia instalable y 1511.26 GWh/año de energía anual. Para la evaluación de los lugares con mayor potencial, se debe considerar otros factores importantes como accesibilidad, población, acceso a la red eléctrica, etc., para poder establecer parámetros de construcción de nuevos parques eólicos.

i.- RECOMENDACIONES

- Antes de realizar cualquier evaluación del recurso eólico, y potencial energético en general, es imprescindible analizar los datos registrados en las estaciones meteorológicas, comprobar su funcionamiento, determinar las condiciones en las que se encuentra instalada, etc., esto con el objeto de asegurar la calidad de la información que va a ser ingresada al modelo.
- Los resultados presentados en el presente informe, solamente muestran la caracterización del recurso eólico en la provincia de Loja. Si se desea conocer el recurso en un determinado sector, se recomienda instalar un anemómetro a una altura de 10 metros por lo menos, y registrar datos con una serie de tiempo, que permita establecer de manera confiable el comportamiento del viento en ese sector.
- Con el propósito de obtener una mejor caracterización del recurso eólico en la provincia de Loja, es recomendable, comparar los resultados con otros modelos y software, por ejemplo, utilizando modelos CFD (dinámica de fluidos computacionales) como WINDSIM, METEODYN, o modelos WRF, que utilizan otros parámetros como variables de entrada, con lo cual brindarán una mayor perspectiva del potencial eólico en una determinada zona.
- En lugares en donde sea imposible la obtención de datos de estaciones meteorológicas, se recomienda, utilizar datos de mesoescala, que es información satelital, disponible en internet, o que puede ser pagada a instituciones internacionales si se desea una mayor resolución.

j.- BIBLIOGRAFÍA

Asociación Mundial de Energía Eólica WWEA. 2011. *Reprte Anual de la Energía Eólica en el Mundo*. El Cairo : s.n., 2011.

Cantarino Marti, Isidro y Goerlich Gisbert, Francisco J. 2010. *Rugosidad del Terreno*. Valencia : s.n., 2010. pág. 31.

Coordinación de Energías Renovables. 2008. *Energías Renovables*. [Secretaría de Energía] [ed.] Tecnología de la Información. Argentina : Dirección Nacional de Promoción, 2008. Energía Eólica.

Grupo de Trabajo para el Impulso de la Energía Eólica. 2006. *Diez Preguntas y Diez Respuestas sobre Energía Eólica*. La Habana : s.n., 2006.

Maldonado, Jorge. 2011. *Proyecto de Electrificación de la Comunidad Rural La Palmira mediante un sistema de energía eólica, empleando el software WAsP*. Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría. La Habana : CUJAE, 2011.

Mastrángelo, Sabino. 2012. *Energía Eólica, Teoría y Características de Instalaciones*. Argentina : s.n., 2012.

Ranaboldo, Mateo. 2009. *Evaluación del recurso eólico a escala micro*. Barcelona : Universitat Politècnica de Catalunya, 2009.

Talayero Navales, Ana Patricia y Telmo Martínez, Enrique. 2008. *Energía Eólica*. 1.a. Zaragoza : Prensas Universitarias de Zaragoza, 2008. pág. 302.

Idrisi Selva. Guía para SIG y procesamiento de imágenes. Manual versión 17.
<http://clarklabs.org/products/spanish-manual.cfm>

ANEXO I: ESTUDIO DE LA CAMPAÑA DE MEDIDA DE VIENTO

1.1. Características de las estaciones de medida y de sus sensores

Se dispone de los datos de 10 estaciones propiedad del Gobierno de Ecuador y se engloban dentro de la red de estaciones meteorológicas del INAMHI (Instituto nacional de meteorología e hidrología).

No se dispone de información acerca de la configuración de la torre de ninguna de las estaciones de medida, ni de las posibles afecciones por accidentes geográficos o de otra índole que puedan afectar a la medida.

Se desconoce la marca y modelo de los sensores instalados, así como la orientación de los brazos soporte. Tampoco se conoce que tipo de data-logger se haya instalado ni la calibración de los anemómetros de cada estación.

1.2. Estudio de la calidad de los datos

Se dispone de datos horarios en todas las estaciones a 10 m de altura, durante el mismo periodo comprendido entre el 28/12/2009 y el 31/01/2011.

Es necesario destacar que se han eliminado todos aquellos registros con valores nulos de forma simultánea en la velocidad media, velocidad máxima y dirección del viento, ya que según el INAMHI se corresponden con una falta de medida.

Por otro lado existen registros con valores nulos únicamente en la variable de la velocidad medida, por lo que se han considerado como calmas medidas en el emplazamiento por las distintas estaciones.

Tras realizar el tratamiento de los datos, no se ha encontrado ninguna incidencia reseñable, sin embargo a continuación se describe las acciones correctivas llevadas a cabo sobre los datos medidos por las estaciones.

Estación	Periodo de medida	INCIDENCIAS	ACCIÓN CORRECTIVA
95001	28/12/2009 - 31/01/2011	Sin incidencias	--
	02/01/2010 - 02/01/2010	Dato repetido (Hora repetida una vez)	Eliminación del registro
	20/12/2010 - 22/12/2010	Baja disponibilidad de datos. También a lo largo del periodo de medida	--
95002	02/01/2010 - 02/01/2010	Dato repetido	Eliminación del registro
	20/12/2010 - 22/12/2010	Baja disponibilidad de datos. También a lo largo del periodo de medida	--
95003	02/01/2010 - 02/01/2010	Dato repetido	Eliminación del registro
	20/12/2010 - 22/12/2010	Baja disponibilidad de datos. También a lo largo del periodo de medida	--
95004	28/12/2009 - 31/01/2011	Sin incidencias	--
	29/06/2010 - 29/06/2010	Dato repetido (Hora repetida dos veces)	Eliminación del registro
	20/12/2010 - 22/12/2010	Baja disponibilidad de datos. También a lo largo del periodo de medida	--
	17/01/2011 - 30/01/2011	Baja disponibilidad	--
95005	28/12/2009 - 31/01/2011	Sin incidencias	--
	29/06/2010 - 29/06/2010	Dato repetido (Hora repetida dos veces)	Eliminación del registro
	20/12/2010 - 22/12/2010	Baja disponibilidad de datos. También a lo largo del periodo de medida	--
95006	28/12/2009 - 31/01/2011	Sin incidencias	--
	20/12/2010 - 22/12/2010	Falla de datos	--
	28/12/2009 - 31/01/2011	Sin incidencias	--
95007	03/09/2010 - 28/09/2010	Baja disponibilidad	--
	09/10/2010 - 18/10/2010	Baja disponibilidad	--
95008	28/12/2009 - 31/01/2011	Sin incidencias	--
	22/12/2010 - 22/12/2010	Falla de datos	--
95009	28/12/2009 - 01/06/2010	Velocidad y dirección nulas	Eliminación de registros
	09/07/2010 - 17/07/2010	Baja disponibilidad	--
	20/12/2010 - 22/12/2010	Falla de datos	--
95010	28/12/2009 - 31/01/2011	Sin incidencias	--
	20/12/2010 - 22/12/2010	Falla de datos	--

Tabla 1. Incidencias y acciones correctivas llevadas a cabo en el tratamiento de los datos de

las estaciones meteorológicas (datos de series climáticas)

1.3. Medias Mensuales durante el periodo total de medidas

2009	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
95001												0.57
10 m												59 8%
95002												0.83
10 m												87 12%
95003												1.24
10 m												82 11%
95004												0.41
10 m												83 11%
95005												0.79
10 m												80 11%
2010	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
95001	0.28	0.22	0.23	0.24	0.36	0.58	0.37	0.46	0.38	0.53	0.46	0.29
10 m	529 71%	474 68%	496 67%	460 64%	468 63%	554 77%	548 74%	649 87%	564 78%	519 70%	383 53%	378 51%
95002	0.90	0.73	0.66	0.72	0.76	1.07	0.88	1.03	0.92	0.88	0.66	0.49
10 m	727 98%	659 95%	719 97%	684 95%	699 94%	683 95%	709 95%	711 96%	666 93%	703 94%	677 94%	649 87%
95003	2.00	1.59	1.65	1.46	1.60	1.89	1.70	1.84	1.62	1.47	0.89	0.77
10 m	714 96%	647 93%	710 95%	687 95%	691 93%	679 94%	722 97%	701 94%	678 94%	716 96%	654 91%	532 83%
95004	0.28	0.30	0.39	0.39	0.35	0.33	0.39	0.41	0.36	0.41	0.33	0.30
10 m	685 92%	584 84%	604 81%	512 71%	561 75%	627 87%	618 83%	713 96%	627 87%	625 84%	591 82%	532 72%
95005	0.63	0.50	0.47	0.46	0.42	0.50	0.56	0.69	0.57	0.69	0.65	0.63
10 m	680 91%	590 85%	647 87%	581 81%	574 77%	629 87%	664 89%	698 94%	645 90%	665 89%	625 87%	601 81%
2011	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
95001	0.27											
10 m	417 56%											
95002	0.50											
10 m	688 92%											
95003	0.95											
10 m	655 88%											
95004	0.27											
10 m	443 60%											
95005	0.70											
10 m	638 86%											
Media Acumulada												
95001	0.37											
10 m	6498 63%											
95002	0.79											
10 m	9061 88%											
95003	1.50											
10 m	8951 87%											
95004	0.35											
10 m	7805 76%											
95005	0.58											
10 m	8317 81%											

Tabla 2. Velocidad media mensual, velocidad media acumulada, disponibilidad y número de datos en el nivel de medida de las estaciones meteorológicas de la 95001 a la 95005 (*datos horarios filtrados*).

2009	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
95006												0.38
10 m												62 8%
95007												1.32
10 m												85 11%
95008												0.95
10 m												80 11%
95009												
10 m												
95010												0.16
10 m												82 11%
2010	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
95006	0.29	0.24	0.30	0.30	0.23	0.24	0.27	0.29	0.32	0.29	0.27	0.20
10 m	629 85%	575 83%	622 84%	576 80%	587 79%	595 83%	592 80%	648 87%	590 82%	569 76%	494 69%	395 53%
95007	0.79	0.62	0.45	0.44	0.44	0.66	0.87	1.17	1.30	1.34	1.36	1.20
10 m	682 92%	598 86%	591 79%	570 79%	590 79%	607 84%	662 89%	638 86%	437 61%	502 67%	567 79%	592 80%
95008	0.84	0.83	0.72	0.72	0.95	1.31	1.14	1.90	1.39	1.19	0.91	0.63
10 m	673 90%	643 92%	706 95%	691 96%	710 95%	689 96%	724 97%	715 96%	693 96%	720 97%	666 93%	647 87%
95009						0.46	0.56	0.66	0.46	0.54	0.43	0.29
10 m						618 86%	549 74%	682 92%	642 89%	646 87%	584 81%	535 72%
95010	0.21	0.20	0.22	0.17	0.14	0.18	0.16	0.29	0.19	0.24	0.10	0.13
10 m	687 92%	630 91%	682 92%	668 93%	677 91%	652 91%	689 93%	691 93%	571 79%	689 93%	641 89%	638 86%
2011	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
95006	0.18											
10 m	512 69%											
95007	1.20											
10 m	642 86%											
95008	0.51											
10 m	664 89%											
95009	0.37											
10 m	551 74%											
95010	0.10											
10 m	656 88%											
Media Acumulada												
95006	0.27											
10 m	7446 73%											
95007	0.90											
10 m	7763 76%											
95008	1.01											
10 m	9021 88%											
95009	0.48											
10 m	4807 47%											
95010	0.18											
10 m	8653 84%											

Tabla 3. Velocidad media mensual, velocidad media acumulada, disponibilidad y número de datos en el nivel de medida de las estaciones meteorológicas de la 95006 a la 95010 (*datos horarios filtrados*).

**ANEXO II: TRATAMIENTO ESTADÍSTICO DE LOS DATOS DURANTE EL
*PERIODO DE REFERENCIA***

Estación 95001 (10 m) – Datos horarios

Emplazamiento: 95001_VILCABAMBA
Período de datos: 01/01/2010 - 31/12/2010
Número de observaciones: 8024
Número de datos erróneos: 2002

RESUMEN

Nivel (m): 10
Velocidad media (m/s): 0.37
Parámetro A de Weibull (m/s): 0.3
Parámetro k de Weibull: 0.75
Velocidad máxima (m/s): 3.1
Dirección velocidad máxima: E

Direcciones predominantes:

E	22.8%	0.67 m/s
SW	18.3%	0.52 m/s

FUNCIÓN DENSIDAD DE PROBABILIDAD

Velocidad (m/s)	Frecuencia (%)	Curva de duración (%)
0.0	44.89	100.00
0.1	11.66	55.11
0.2	6.68	43.46
0.3	4.98	36.78
0.4	3.85	31.80
0.5	3.32	27.95
0.6	2.94	24.63
0.7	2.19	21.69
0.8	2.27	19.50
0.9	1.89	17.22
1.0	1.84	15.33
1.1	1.68	13.48
1.2	1.49	11.81
1.3	1.33	10.31
1.4	1.64	8.98
1.5	1.16	7.34
1.6	1.18	6.18
1.7	0.91	5.00
1.8	0.95	4.09
1.9	0.66	3.14
2.0	0.45	2.47
2.1	0.61	2.03
2.2	0.43	1.41
2.3	0.28	0.98
2.4	0.30	0.70
2.5	0.18	0.40
2.6	0.10	0.22
2.7	0.08	0.12
2.8	0.02	0.03
2.9	0.00	0.02
3.0	0.00	0.02

DISTRIBUCIÓN DIRECCIONAL

Rumbo	Frecuencia (%)	Vmedia (m/s)
N	2.89	0.10
NNE	6.51	0.26
NE	5.98	0.34
ENE	6.97	0.49
E	22.80	0.67
ESE	10.33	0.02
SE	0.56	0.11
SSE	0.47	0.11
S	0.98	0.13
SSW	3.52	0.32
SW	18.33	0.52
WSW	9.58	0.20
W	2.37	0.15
WNW	1.81	0.16
NW	2.59	0.24
NNW	4.30	0.06

DIA MEDIO DEL PERIODO

Hora	Vmedia (m/s)
0	0.07
1	0.07
2	0.07
3	0.08
4	0.07
5	0.07
6	0.06
7	0.07
8	0.10
9	0.13
10	0.26
11	0.45
12	0.58
13	0.67
14	0.70
15	0.76
16	0.79
17	0.81
18	0.70
19	0.40
20	0.18
21	0.11
22	0.08
23	0.07

Estación 95002 (10 m) – Datos horarios

Emplazamiento: 95002_CHUQUIRIBAMBA

Período de datos: 01/01/2010 - 31/12/2010

Número de observaciones: 8364

Número de datos erróneos: 78

RESUMEN

Nivel (m): 10

Velocidad media (m/s): 0.81

Parámetro A de Weibull (m/s): 0.9

Parámetro k de Weibull: 1.44

Velocidad máxima (m/s): 5.2

Dirección velocidad máxima: ENE

Direcciones predominantes:

SSE 17.3% 1.00 m/s

N 14.4% 0.47 m/s

FUNCIÓN DENSIDAD DE PROBABILIDAD

Velocidad (m/s)	Frecuencia (%)	Curva de duración (%)
0.0	7.33	100.00
0.1	7.93	92.67
0.2	6.61	84.75
0.3	6.35	78.13
0.4	5.90	71.78
0.5	6.19	65.88
0.6	6.72	59.69
0.7	5.65	52.97
0.8	5.90	47.32
0.9	5.35	41.42
1.0	4.68	36.07
1.1	4.83	31.39
1.2	3.71	26.56
1.3	3.40	22.86
1.4	3.22	19.45
1.5	2.96	16.23
1.6	2.72	13.28
1.7	2.05	10.56
1.8	1.54	8.51
1.9	1.54	6.96
2.0	1.09	5.42
2.1	1.09	4.33
2.2	0.68	3.25
2.3	0.57	2.57
2.4	0.52	2.00
2.5	0.40	1.48
2.6	0.27	1.09
2.7	0.18	0.82
2.8	0.17	0.64
2.9	0.13	0.47
3.0	0.11	0.34

DISTRIBUCIÓN DIRECCIONAL

Rumbo	Frecuencia (%)	Vmedia (m/s)
N	14.43	0.47
NNE	3.49	0.36
NE	0.75	0.53
ENE	3.33	1.14
E	6.35	0.97
ESE	8.07	0.92
SE	13.29	1.11
SSE	17.32	1.00
S	13.35	0.86
SSW	7.39	0.72
SW	4.63	0.62
WSW	2.79	0.75
W	1.54	0.40
WNW	0.87	0.27
NW	0.89	0.23
NNW	1.51	0.21

DIA MEDIO DEL PERIODO

Hora	Vmedia (m/s)
0	0.60
1	0.65
2	0.61
3	0.58
4	0.59
5	0.62
6	0.64
7	0.67
8	0.67
9	0.94
10	1.16
11	1.26
12	1.32
13	1.32
14	1.24
15	1.07
16	0.98
17	0.88
18	0.73
19	0.60
20	0.54
21	0.56
22	0.61
23	0.62

Estación 95003 (10 m) – Datos horarios

Emplazamiento: 95003_YANGANA
Período de datos: 01/01/2010 - 31/12/2010
Número de observaciones: 8400
Número de datos erróneos: 186

RESUMEN

Nivel (m):	10	
Velocidad media (m/s):	1.55	
Parámetro A de Weibull (m/s):	1.9	
Parámetro k de Weibull:	1.69	
Velocidad máxima (m/s):	6.0	
Dirección velocidad máxima:	S	
Direcciones predominantes:		
SE	35.2%	1.66 m/s
SSE	34.2%	1.97 m/s

FUNCIÓN DENSIDAD DE PROBABILIDAD

Velocidad (m/s)	Frecuencia (%)	Curva de duración (%)
0.0	7.72	100.00
0.1	6.42	92.28
0.2	4.15	85.87
0.3	3.57	81.71
0.4	3.29	78.15
0.5	3.02	74.86
0.6	2.71	71.84
0.7	2.41	69.13
0.8	2.67	66.72
0.9	2.26	64.05
1.0	2.15	61.78
1.1	2.51	59.63
1.2	2.14	57.12
1.3	2.09	54.98
1.4	2.26	52.89
1.5	2.14	50.62
1.6	2.53	48.48
1.7	2.18	45.95
1.8	2.58	43.77
1.9	2.68	41.19
2.0	2.67	38.51
2.1	2.61	35.84
2.2	2.64	33.24
2.3	3.01	30.59
2.4	3.04	27.59
2.5	2.51	24.54
2.6	2.75	22.04
2.7	2.26	19.28
2.8	2.09	17.02
2.9	1.94	14.93
3.0	1.57	12.99

DISTRIBUCIÓN DIRECCIONAL

Rumbo	Frecuencia (%)	Vmedia (m/s)
N	2.86	0.74
NNE	1.96	0.35
NE	1.24	0.23
ENE	0.65	0.32
E	1.02	0.54
ESE	4.63	1.32
SE	35.18	1.66
SSE	34.20	1.97
S	3.40	1.70
SSW	0.45	0.28
SW	0.30	0.18
WSW	0.30	0.15
W	0.28	0.18
WNW	0.91	0.38
NW	5.36	0.86
NNW	7.26	1.18

DIA MEDIO DEL PERIODO

Hora	Vmedia (m/s)
0	1.26
1	1.21
2	1.21
3	1.21
4	1.17
5	1.16
6	1.24
7	1.24
8	1.27
9	1.39
10	1.78
11	2.12
12	2.20
13	2.21
14	2.14
15	2.08
16	1.95
17	1.87
18	1.69
19	1.57
20	1.41
21	1.32
22	1.24
23	1.27

Estación 95004 (10 m) – Datos horarios

Emplazamiento: 95004_CARIAMANGA
Período de datos: 01/01/2010 - 31/12/2010
Número de observaciones: 8041
Número de datos erróneos: 762

RESUMEN

Nivel (m):	10
Velocidad media (m/s):	0.35
Parámetro A de Weibull (m/s):	0.4
Parámetro k de Weibull:	0.95
Velocidad máxima (m/s):	2.8
Dirección velocidad máxima:	NW
Direcciones predominantes:	
NW	38.5% 0.62 m/s
SE	18.8% 0.07 m/s

FUNCIÓN DENSIDAD DE PROBABILIDAD

Velocidad (m/s)	Frecuencia (%)	Curva de duración (%)
0.0	36.39	100.00
0.1	13.68	63.61
0.2	7.39	49.92
0.3	5.74	42.53
0.4	5.04	36.79
0.5	4.11	31.75
0.6	4.45	27.64
0.7	3.39	23.19
0.8	3.68	19.80
0.9	3.61	16.11
1.0	2.87	12.50
1.1	2.82	9.63
1.2	1.91	6.81
1.3	1.54	4.90
1.4	1.26	3.37
1.5	0.80	2.10
1.6	0.52	1.31
1.7	0.23	0.78
1.8	0.23	0.55
1.9	0.12	0.32
2.0	0.05	0.19
2.1	0.08	0.14
2.2	0.01	0.05
2.3	0.01	0.04
2.4	0.01	0.03
2.5	0.00	0.01
2.6	0.00	0.01
2.7	0.00	0.01
2.8	0.01	0.01
2.9	0.00	0.00
3.0	0.00	0.00

DISTRIBUCIÓN DIRECCIONAL

Rumbo	Frecuencia (%)	Vmedia (m/s)
N	1.66	0.23
NNE	0.93	0.12
NE	1.00	0.05
ENE	1.31	0.03
E	1.40	0.04
ESE	4.04	0.09
SE	18.77	0.07
SSE	5.88	0.06
S	2.36	0.05
SSW	1.74	0.19
SW	0.96	0.31
WSW	0.82	0.25
W	1.70	0.24
WNW	11.22	0.39
NW	38.47	0.62
NNW	7.72	0.41

DIA MEDIO DEL PERIODO

Hora	Vmedia (m/s)
0	0.07
1	0.07
2	0.06
3	0.06
4	0.06
5	0.07
6	0.06
7	0.05
8	0.06
9	0.24
10	0.58
11	0.78
12	0.84
13	0.86
14	0.80
15	0.76
16	0.77
17	0.71
18	0.50
19	0.21
20	0.10
21	0.10
22	0.08
23	0.07

Estación 95005 (10 m) – Datos horarios

Emplazamiento: 95005_EL ALMENDRAL

Período de datos: 01/01/2010 - 31/12/2010

Número de observaciones: 8415

Número de datos erróneos: 816

RESUMEN

Nivel (m): 10

Velocidad media (m/s): 0.57

Parámetro A de Weibull (m/s): 0.6

Parámetro k de Weibull: 0.91

Velocidad máxima (m/s): 4.5

Dirección velocidad máxima: ENE

Direcciones predominantes:

S 21.1% 1.23 m/s

WNW 16.1% 0.05 m/s

FUNCIÓN DENSIDAD DE PROBABILIDAD

Velocidad (m/s)	Frecuencia (%)	Curva de duración (%)
0.0	30.19	100.00
0.1	13.71	69.81
0.2	5.93	56.10
0.3	5.08	50.16
0.4	4.61	45.08
0.5	4.09	40.48
0.6	3.79	36.39
0.7	3.00	32.60
0.8	2.86	29.60
0.9	2.67	26.74
1.0	2.53	24.07
1.1	2.08	21.54
1.2	1.91	19.46
1.3	1.91	17.55
1.4	1.74	15.65
1.5	1.80	13.91
1.6	1.74	12.11
1.7	1.47	10.37
1.8	1.45	8.90
1.9	1.17	7.45
2.0	1.07	6.28
2.1	0.80	5.21
2.2	0.83	4.41
2.3	0.96	3.58
2.4	0.72	2.62
2.5	0.55	1.89
2.6	0.26	1.34
2.7	0.22	1.08
2.8	0.20	0.86
2.9	0.14	0.66
3.0	0.11	0.51

DISTRIBUCIÓN DIRECCIONAL

Rumbo	Frecuencia (%)	Vmedia (m/s)
N	0.37	0.05
NNE	0.43	0.06
NE	0.66	0.50
ENE	4.80	0.59
E	6.20	0.37
ESE	4.86	0.31
SE	4.16	0.24
SSE	6.04	0.58
S	21.08	1.23
SSW	11.21	0.68
SW	10.51	0.56
WSW	6.07	0.72
W	5.18	0.13
WNW	16.12	0.05
NW	1.97	0.03
NNW	0.33	0.05

DIA MEDIO DEL PERIODO

Hora	Vmedia (m/s)
0	0.09
1	0.06
2	0.05
3	0.04
4	0.04
5	0.04
6	0.03
7	0.02
8	0.06
9	0.26
10	0.43
11	0.67
12	1.13
13	1.63
14	1.87
15	1.62
16	1.27
17	0.99
18	0.83
19	0.62
20	0.37
21	0.23
22	0.16
23	0.12

Estación 95006 (10 m) – Datos horarios

Emplazamiento: 95006_CHANGAIMINA
Período de datos: 01/01/2010 - 31/12/2010
Número de observaciones: 7923
Número de datos erróneos: 1051

RESUMEN

Nivel (m):	10
Velocidad media (m/s):	0.27
Parámetro A de Weibull (m/s):	0.2
Parámetro k de Weibull:	0.74
Velocidad máxima (m/s):	3.1
Dirección velocidad máxima:	WNW
Direcciones predominantes:	
WNW	18.8% 0.47 m/s
NW	14.4% 0.46 m/s

FUNCIÓN DENSIDAD DE PROBABILIDAD

Velocidad (m/s)	Frecuencia (%)	Curva de duración (%)
0.0	37.73	100.00
0.1	19.00	62.27
0.2	10.00	43.26
0.3	7.06	33.27
0.4	5.14	26.21
0.5	4.35	21.07
0.6	3.32	16.72
0.7	2.26	13.40
0.8	2.04	11.15
0.9	1.72	9.11
1.0	1.46	7.39
1.1	1.24	5.94
1.2	0.83	4.70
1.3	0.84	3.87
1.4	0.52	3.03
1.5	0.61	2.50
1.6	0.31	1.89
1.7	0.35	1.59
1.8	0.16	1.24
1.9	0.25	1.08
2.0	0.22	0.83
2.1	0.16	0.61
2.2	0.09	0.45
2.3	0.12	0.36
2.4	0.06	0.25
2.5	0.03	0.19
2.6	0.04	0.16
2.7	0.03	0.12
2.8	0.00	0.09
2.9	0.06	0.09
3.0	0.01	0.03

DISTRIBUCIÓN DIRECCIONAL

Rumbo	Frecuencia (%)	Vmedia (m/s)
N	11.79	0.12
NNE	5.85	0.05
NE	2.18	0.05
ENE	1.02	0.13
E	1.24	0.13
ESE	3.39	0.27
SE	9.04	0.39
SSE	9.85	0.24
S	2.53	0.10
SSW	2.05	0.07
SW	1.89	0.07
WSW	2.34	0.08
W	4.63	0.13
WNW	18.82	0.47
NW	14.42	0.46
NNW	8.96	0.16

DIA MEDIO DEL PERIODO

Hora	Vmedia (m/s)
0	0.07
1	0.05
2	0.04
3	0.04
4	0.05
5	0.04
6	0.03
7	0.04
8	0.04
9	0.10
10	0.19
11	0.28
12	0.34
13	0.36
14	0.36
15	0.42
16	0.58
17	0.60
18	0.57
19	0.54
20	0.51
21	0.38
22	0.23
23	0.12

Estación 95007 (10 m) – Datos horarios

Emplazamiento: 95007_ZAPOTILLO
Período de datos: 01/01/2010 - 31/12/2010
Número de observaciones: 7568
Número de datos erróneos: 532

RESUMEN

Nivel (m): 10
Velocidad media (m/s): 0.87
Parámetro A de Weibull (m/s): 0.9
Parámetro k de Weibull: 1.09
Velocidad máxima (m/s): 3.7
Dirección velocidad máxima: SSW

Direcciones predominantes:

SSW	38.4%	1.14 m/s
SW	17.5%	1.14 m/s

FUNCIÓN DENSIDAD DE PROBABILIDAD

Velocidad (m/s)	Frecuencia (%)	Curva de duración (%)
0.0	15.99	100.00
0.1	9.28	84.01
0.2	7.04	74.73
0.3	6.00	67.69
0.4	6.08	61.70
0.5	5.20	55.61
0.6	4.11	50.41
0.7	3.87	46.30
0.8	3.41	42.44
0.9	3.17	39.03
1.0	2.79	35.86
1.1	2.33	33.07
1.2	2.03	30.74
1.3	2.17	28.71
1.4	2.05	26.53
1.5	2.10	24.49
1.6	2.03	22.38
1.7	1.76	20.35
1.8	1.86	18.59
1.9	1.88	16.73
2.0	1.63	14.85
2.1	1.38	13.22
2.2	1.48	11.84
2.3	1.39	10.36
2.4	1.35	8.97
2.5	1.18	7.62
2.6	1.24	6.44
2.7	0.99	5.20
2.8	1.05	4.21
2.9	1.07	3.16
3.0	0.48	2.09

DISTRIBUCIÓN DIRECCIONAL

Rumbo	Frecuencia (%)	Vmedia (m/s)
N	1.99	0.35
NNE	1.71	0.12
NE	1.19	0.23
ENE	0.60	0.22
E	0.33	0.18
ESE	0.67	0.22
SE	2.00	0.31
SSE	4.85	0.40
S	16.20	0.79
SSW	38.40	1.14
SW	17.52	1.14
WSW	3.68	0.43
W	2.15	0.28
WNW	1.75	0.44
NW	4.49	0.44
NNW	2.47	0.58

DIA MEDIO DEL PERIODO

Hora	Vmedia (m/s)
0	0.59
1	0.39
2	0.33
3	0.23
4	0.22
5	0.18
6	0.16
7	0.13
8	0.23
9	0.32
10	0.45
11	0.64
12	0.96
13	1.31
14	1.51
15	1.59
16	1.64
17	1.48
18	1.38
19	1.29
20	1.44
21	1.42
22	1.20
23	0.92

Estación 95008 (10 m) – Datos horarios

Emplazamiento: 95008_QUILANGA
Período de datos: 01/01/2010 - 31/12/2010
Número de observaciones: 8438
Número de datos erróneos: 161

RESUMEN

Nivel (m): 10
Velocidad media (m/s): 1.05
Parámetro A de Weibull (m/s): 1.2
Parámetro k de Weibull: 1.31
Velocidad máxima (m/s): 5.5
Dirección velocidad máxima: ENE

Direcciones predominantes:

SSW	20.3%	0.74 m/s
N	12.5%	0.53 m/s

FUNCIÓN DENSIDAD DE PROBABILIDAD

Velocidad (m/s)	Frecuencia (%)	Curva de duración (%)
0.0	13.50	100.00
0.1	8.72	86.50
0.2	5.46	77.78
0.3	4.58	72.32
0.4	4.20	67.74
0.5	3.58	63.54
0.6	3.47	59.96
0.7	3.43	56.49
0.8	3.31	53.06
0.9	3.08	49.75
1.0	2.72	46.67
1.1	3.18	43.95
1.2	3.00	40.78
1.3	3.21	37.78
1.4	2.88	34.57
1.5	3.06	31.69
1.6	2.85	28.63
1.7	2.56	25.78
1.8	2.38	23.22
1.9	2.17	20.84
2.0	2.21	18.67
2.1	2.03	16.46
2.2	1.80	14.43
2.3	1.73	12.63
2.4	1.51	10.90
2.5	1.40	9.39
2.6	1.18	7.99
2.7	1.20	6.80
2.8	0.86	5.61
2.9	0.93	4.75
3.0	0.53	3.82

DISTRIBUCIÓN DIRECCIONAL

Rumbo	Frecuencia (%)	Vmedia (m/s)
N	12.47	0.53
NNE	2.57	0.62
NE	5.04	1.62
ENE	9.30	1.92
E	11.21	1.74
ESE	7.36	1.49
SE	4.49	1.32
SSE	2.77	1.15
S	3.25	0.59
SSW	20.26	0.74
SW	6.63	0.44
WSW	1.45	0.22
W	0.71	0.41
WNW	0.64	0.60
NW	1.47	0.77
NNW	10.37	0.92

DIA MEDIO DEL PERIODO

Hora	Vmedia (m/s)
0	0.62
1	0.68
2	0.68
3	0.74
4	0.76
5	0.86
6	0.89
7	0.82
8	0.63
9	0.85
10	1.16
11	1.45
12	1.57
13	1.56
14	1.58
15	1.52
16	1.52
17	1.49
18	1.34
19	1.17
20	1.02
21	0.81
22	0.74
23	0.72

Estación 95009 (10 m) – Datos horarios

Emplazamiento: 95009_AMALUZA
Período de datos: 01/01/2010 - 31/12/2010
Número de observaciones: 7788
Número de datos erróneos: 3532

RESUMEN

Nivel (m):	10	
Velocidad media (m/s):	0.49	
Parámetro A de Weibull (m/s):	0.5	
Parámetro k de Weibull:	0.9	
Velocidad máxima (m/s):	4.1	
Dirección velocidad máxima:	ESE	
Direcciones predominantes:		
ESE	17.7%	0.41 m/s
SE	16.0%	0.26 m/s

FUNCIÓN DENSIDAD DE PROBABILIDAD

Velocidad (m/s)	Frecuencia (%)	Curva de duración (%)
0.0	26.57	100.00
0.1	16.49	73.43
0.2	8.15	56.93
0.3	6.27	48.78
0.4	5.22	42.50
0.5	4.56	37.29
0.6	4.04	32.73
0.7	2.84	28.69
0.8	2.94	25.85
0.9	2.80	22.91
1.0	2.70	20.11
1.1	2.33	17.41
1.2	2.09	15.08
1.3	2.42	12.99
1.4	1.57	10.57
1.5	1.81	9.00
1.6	1.34	7.19
1.7	0.80	5.85
1.8	1.06	5.05
1.9	0.75	3.99
2.0	0.68	3.24
2.1	0.35	2.56
2.2	0.35	2.21
2.3	0.38	1.86
2.4	0.56	1.48
2.5	0.14	0.92
2.6	0.14	0.78
2.7	0.12	0.63
2.8	0.14	0.52
2.9	0.00	0.38
3.0	0.05	0.38

DISTRIBUCIÓN DIRECCIONAL

Rumbo	Frecuencia (%)	Vmedia (m/s)
N	1.93	0.52
NNE	2.02	0.53
NE	2.35	0.45
ENE	2.28	0.50
E	4.82	0.44
ESE	17.65	0.41
SE	15.98	0.26
SSE	1.53	0.15
S	0.61	0.17
SSW	1.03	0.19
SW	4.35	0.65
WSW	10.64	0.62
W	15.34	0.77
WNW	13.32	0.62
NW	3.88	0.18
NNW	2.28	0.30

DIA MEDIO DEL PERIODO

Hora	Vmedia (m/s)
0	0.12
1	0.12
2	0.10
3	0.11
4	0.11
5	0.08
6	0.09
7	0.11
8	0.11
9	0.30
10	0.58
11	0.84
12	0.93
13	0.91
14	1.00
15	1.06
16	1.18
17	1.00
18	0.90
19	0.72
20	0.50
21	0.29
22	0.18
23	0.15

Estación 95010 (10 m) – Datos horarios

Emplazamiento: 95010_EL INGENIO
Período de datos: 01/01/2010 - 31/12/2010
Número de observaciones: 7920
Número de datos erróneos: 5

RESUMEN

Nivel (m):	10	
Velocidad media (m/s):	0.19	
Parámetro A de Weibull (m/s):	0.1	
Parámetro k de Weibull:	0.58	
Velocidad máxima (m/s):	3.0	
Dirección velocidad máxima:	ENE	
Direcciones predominantes:		
SSW	24.6%	0.30 m/s
S	14.2%	0.26 m/s

FUNCIÓN DENSIDAD DE PROBABILIDAD

Velocidad (m/s)	Frecuencia (%)	Curva de duración (%)
0.0	58.46	100.00
0.1	14.09	41.54
0.2	5.72	27.45
0.3	4.91	21.73
0.4	3.39	16.82
0.5	2.56	13.43
0.6	1.88	10.87
0.7	1.44	8.98
0.8	1.19	7.54
0.9	0.96	6.36
1.0	0.71	5.39
1.1	0.66	4.69
1.2	0.64	4.03
1.3	0.54	3.39
1.4	0.52	2.84
1.5	0.37	2.32
1.6	0.27	1.96
1.7	0.32	1.69
1.8	0.29	1.38
1.9	0.25	1.09
2.0	0.16	0.83
2.1	0.16	0.67
2.2	0.11	0.51
2.3	0.15	0.39
2.4	0.04	0.24
2.5	0.10	0.20
2.6	0.06	0.10
2.7	0.01	0.04
2.8	0.01	0.03
2.9	0.00	0.01
3.0	0.01	0.01

DISTRIBUCIÓN DIRECCIONAL

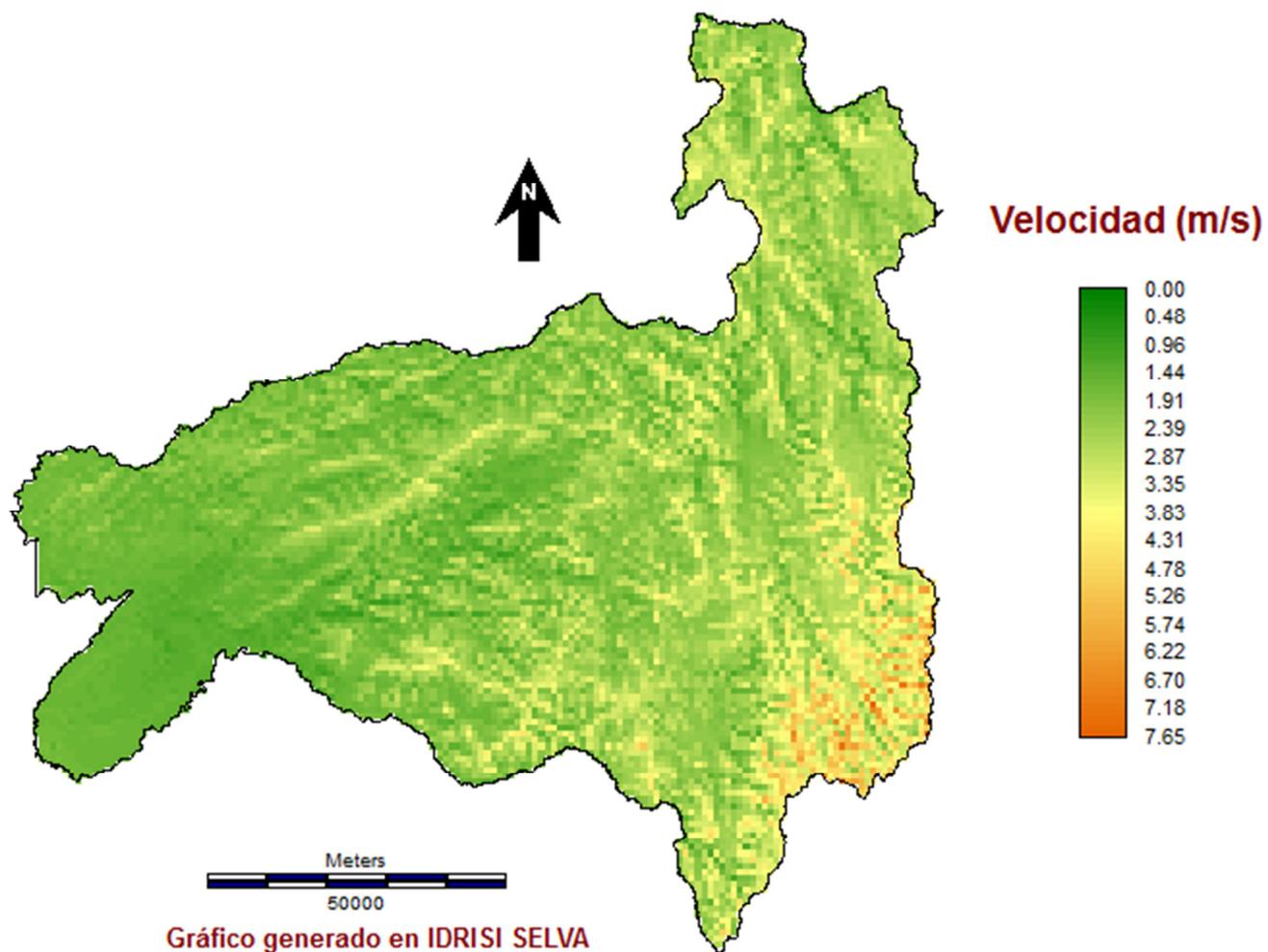
Rumbo	Frecuencia (%)	Vmedia (m/s)
N	4.09	0.01
NNE	7.42	0.35
NE	6.05	0.24
ENE	2.93	0.18
E	1.91	0.09
ESE	1.72	0.13
SE	2.83	0.12
SSE	4.01	0.05
S	14.19	0.26
SSW	24.61	0.30
SW	10.55	0.10
WSW	5.56	0.04
W	5.50	0.06
WNW	3.34	0.06
NW	2.55	0.01
NNW	2.75	0.01

DIA MEDIO DEL PERIODO

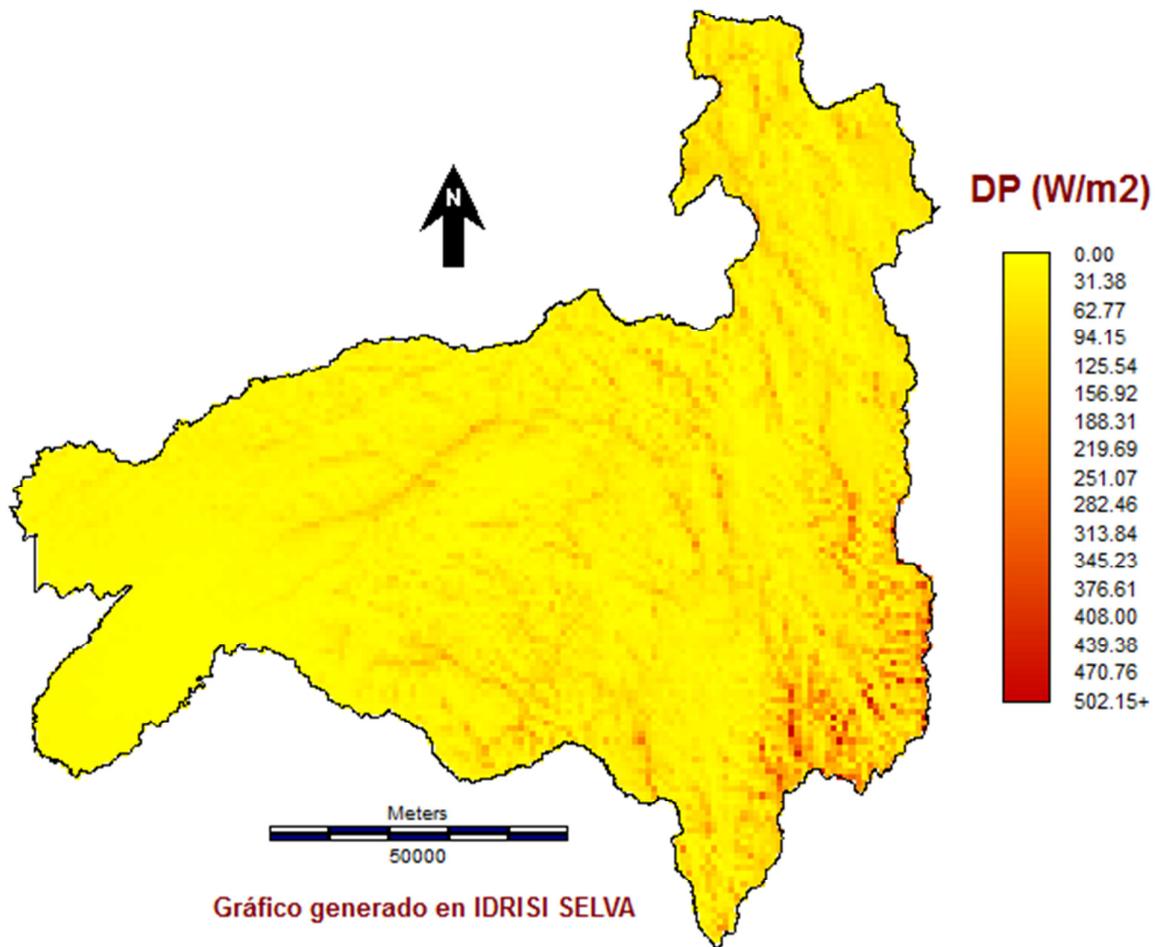
Hora	Vmedia (m/s)
0	0.02
1	0.02
2	0.01
3	0.01
4	0.01
5	0.01
6	0.01
7	0.01
8	0.01
9	0.03
10	0.08
11	0.18
12	0.28
13	0.35
14	0.46
15	0.57
16	0.60
17	0.60
18	0.55
19	0.37
20	0.21
21	0.11
22	0.04
23	0.02

ANEXO III: MAPAS GENERADOS CON IDRISI

Mapa de velocidad promedio en la provincia de Loja a 80 m de altura



Densidad de potencia eólica en la provincia de Loja



ANEXO IV: PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO CON WASP

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Objeto

El objetivo del presente documento es la elaboración de un manual muy básico y visual del uso del programa WAsP (V10.1), explicando el procedimiento llevado a cabo en la modelización del recurso eólico en la provincia de Loja.

Para mayor información ver el documento “20130125_Mapa_Eólico_Loja.docx”.

1.2. Datos de partida

Los datos iniciales necesarios para el cálculo son los siguientes.

- Datos de la estación de medida (velocidad y dirección): fichero *.tab.
- Coordenadas de la estación de medida.
- Mapa con las curvas de nivel y de rugosidad: fichero *.map.
- Coordenadas de la extensión del mallado (esquina inferior izquierda y esquina superior derecha) y medida de la celda del mallado (resolución).
- Altura de buje o a la que se quieran los resultados.

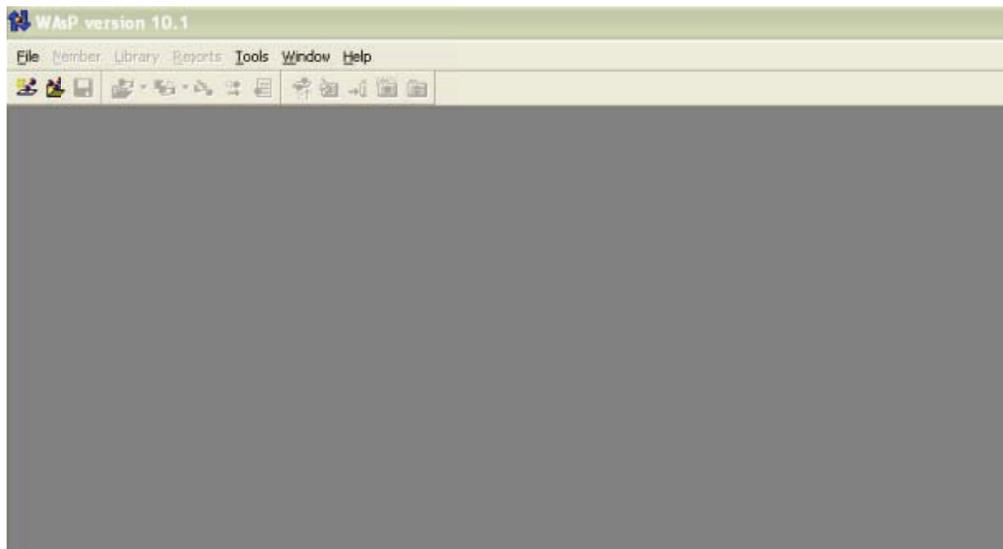
Como ejemplo del cálculo, se han tomado los datos relativos a la estación de medida 95007 Zapotillo. El procedimiento se hace extensible al resto de estaciones situadas en la provincia de Loja (documento “20130125_Mapa_Eólico_Loja.docx”).

2. TRABAJAR CON EL PROGRAMA

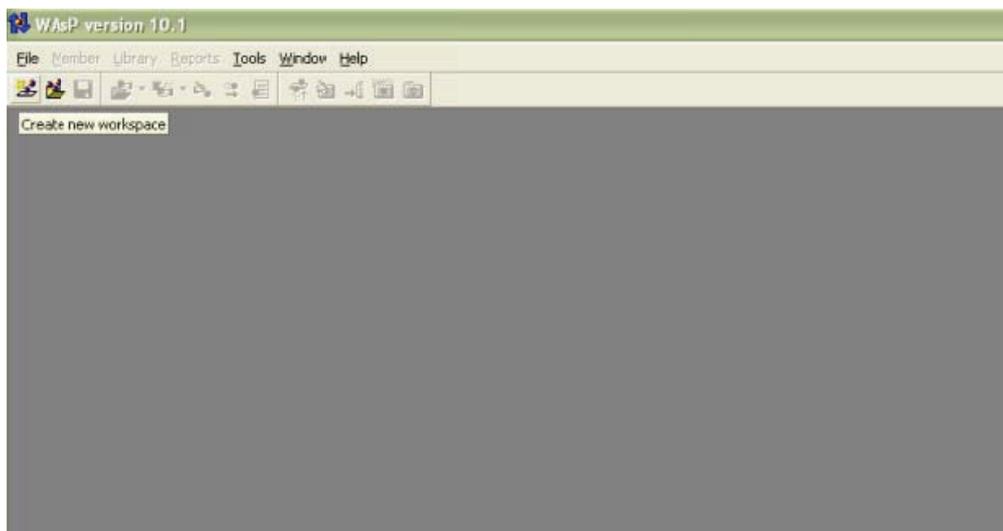
En el siguiente apartado se explica el procedimiento llevado a cabo con el programa WAsP (V10.1).

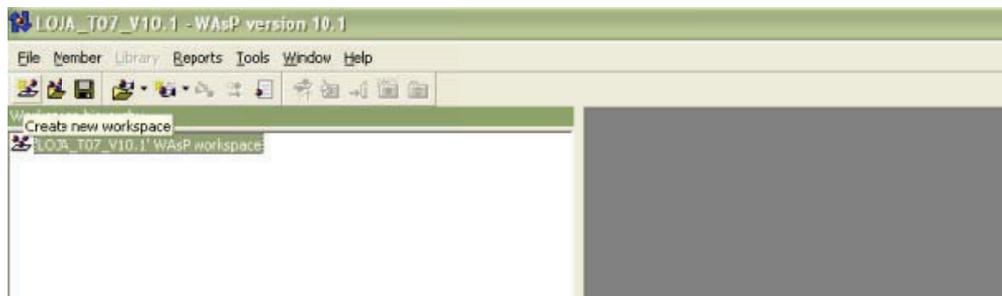
2.1. Abrir el programa / Crear nuevo proyecto / Guardar el proyecto

Abrir el programa.

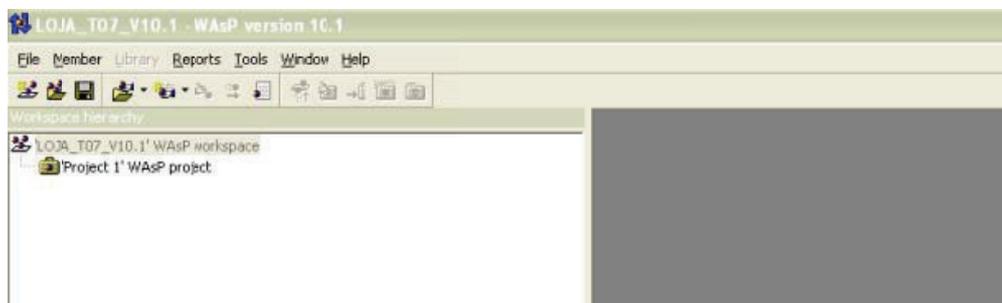
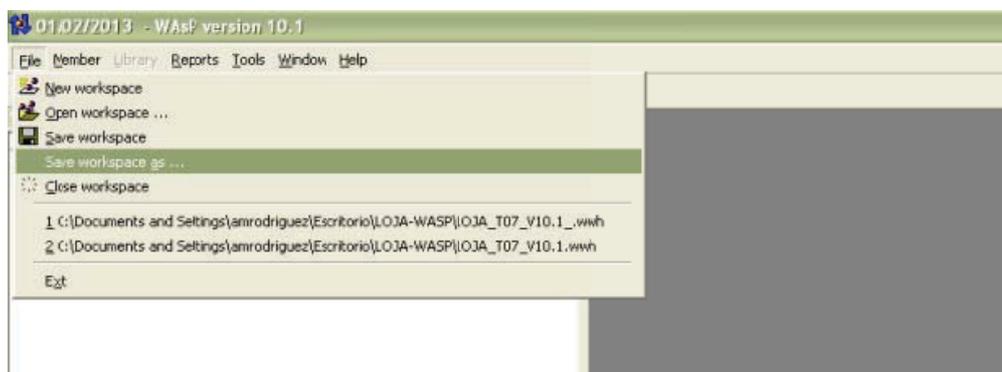


Crear un nuevo proyecto.



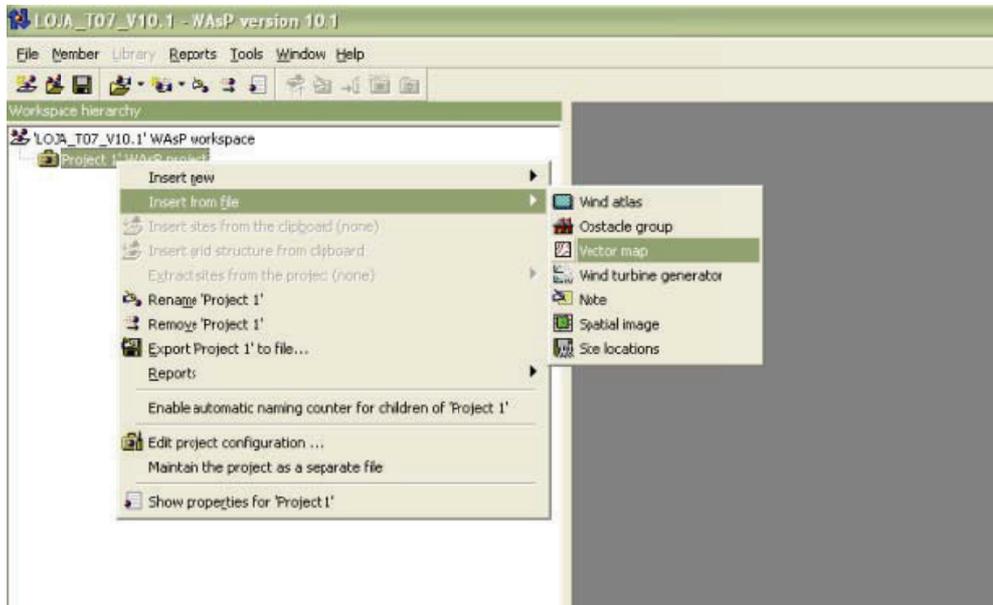


Guardar el proyecto con un nombre File/Save workspace as

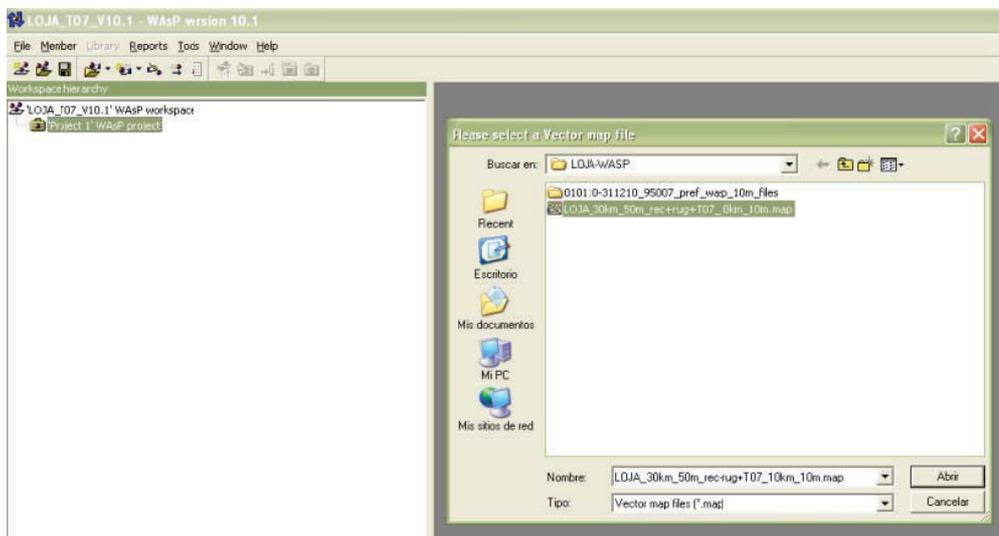


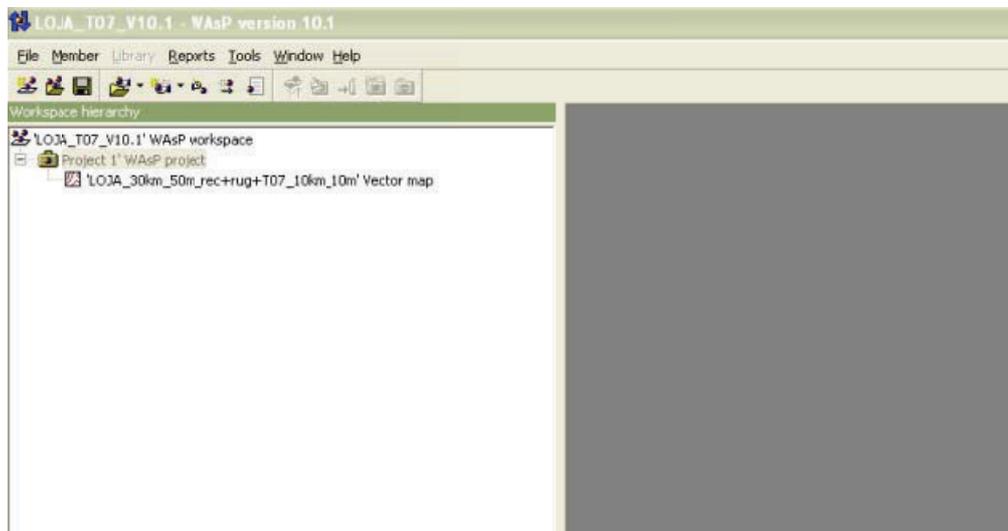
2.2. Insertar mapa con curvas de nivel y de rugosidad (fichero *.map)

Botón derecho sobre "Project".

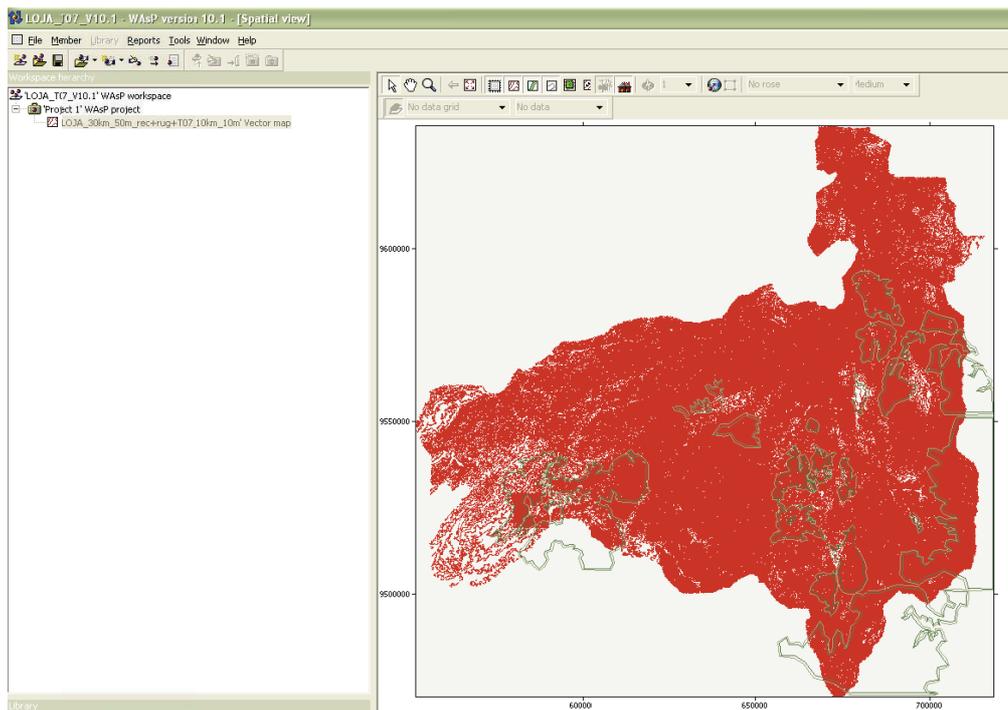


Se abre una ventana para buscar el fichero *.map.



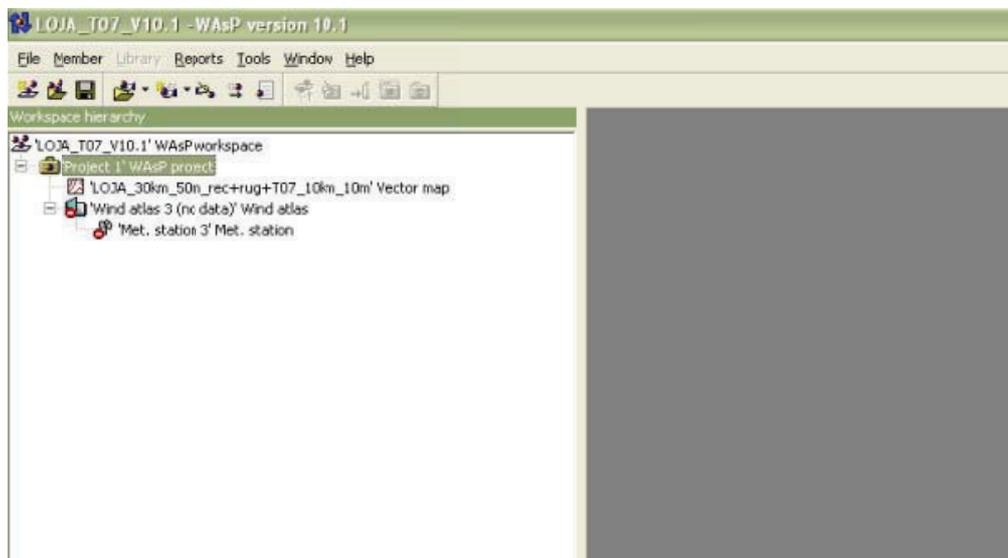
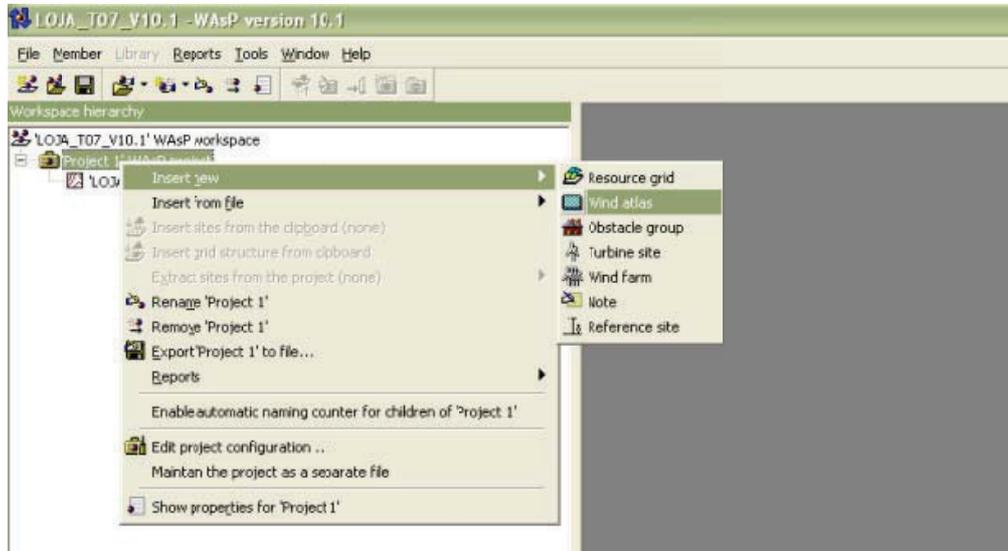


Haciendo doble clic en el mapa se puede visualizar.

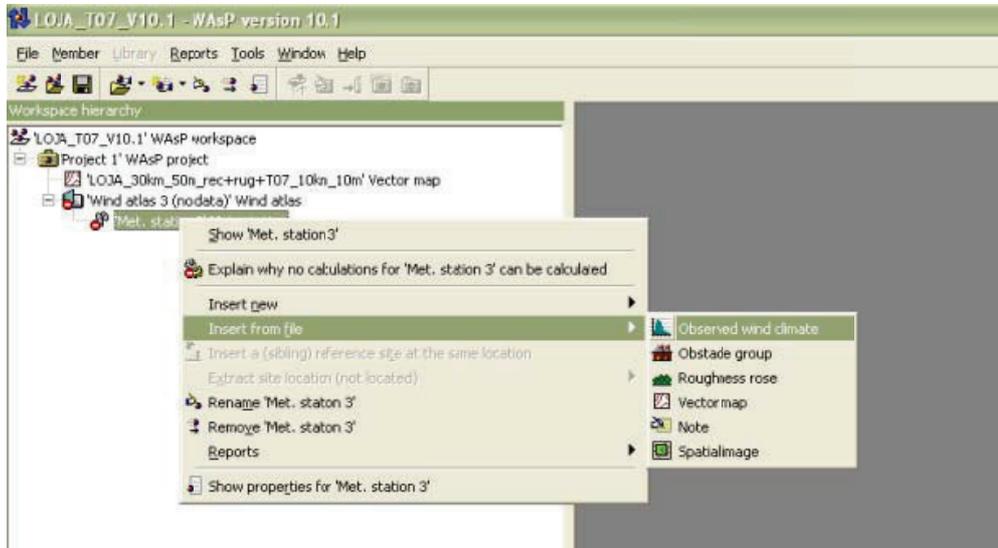


2.3. Insertar datos de la estación de medida (archivo *.tab)

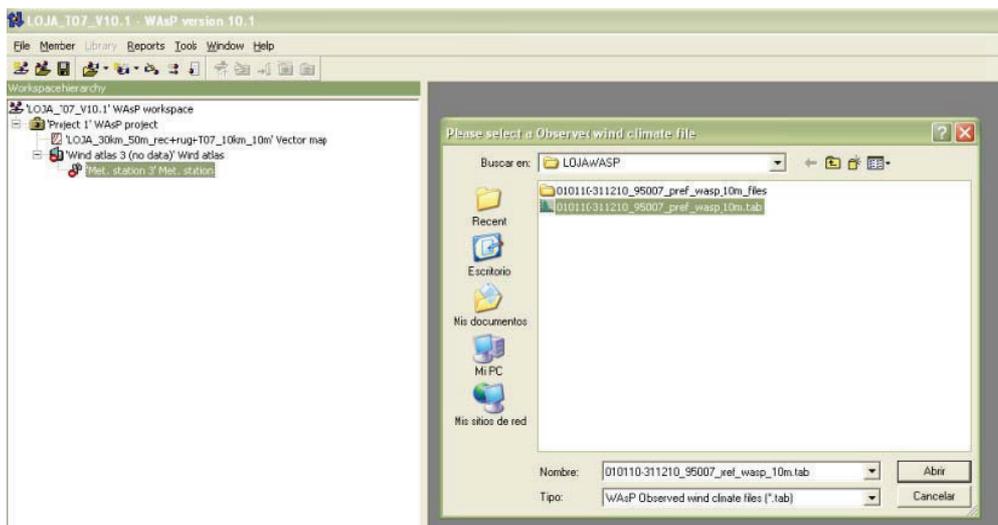
Botón derecho sobre "Project" e insertar "Wind atlas".

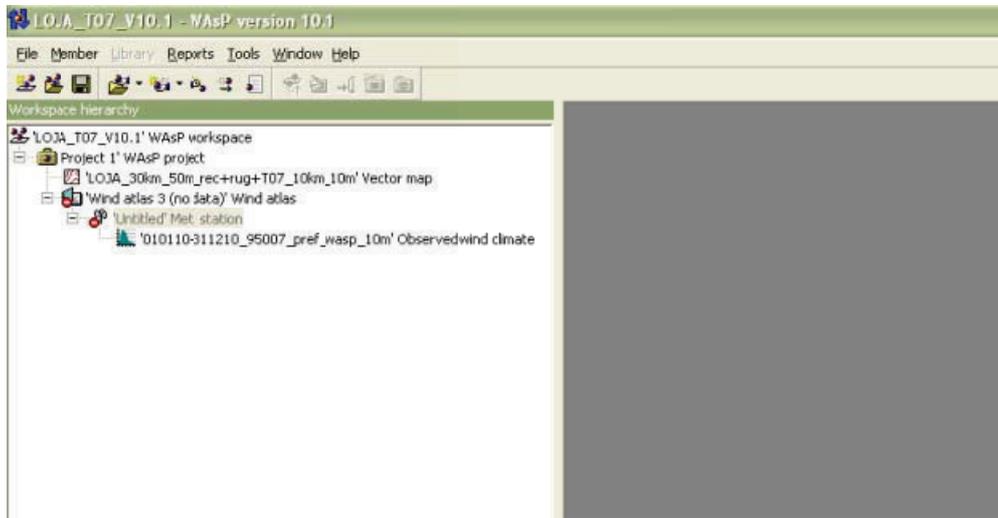


Botón derecho sobre "Met. station".

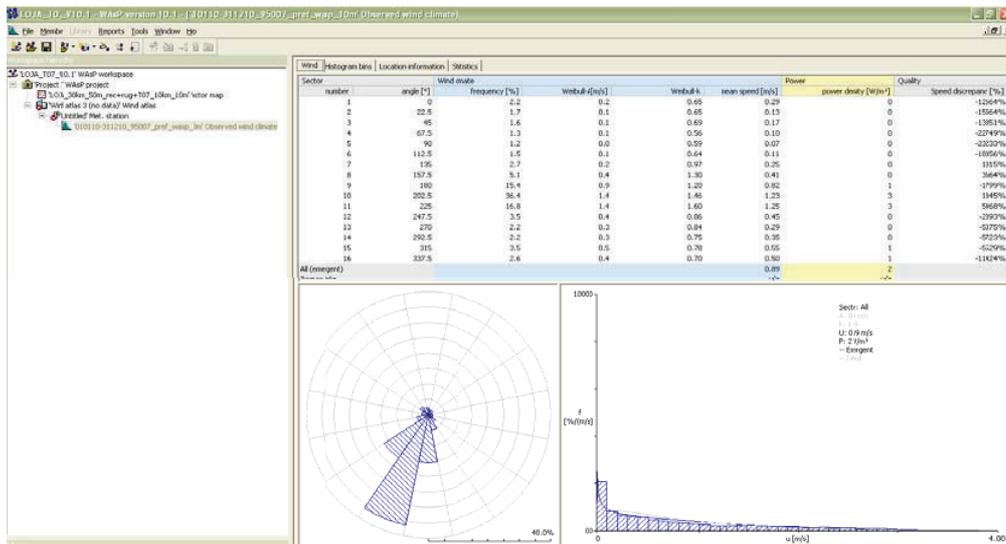


Se abre una ventana para buscar el fichero *.tab.

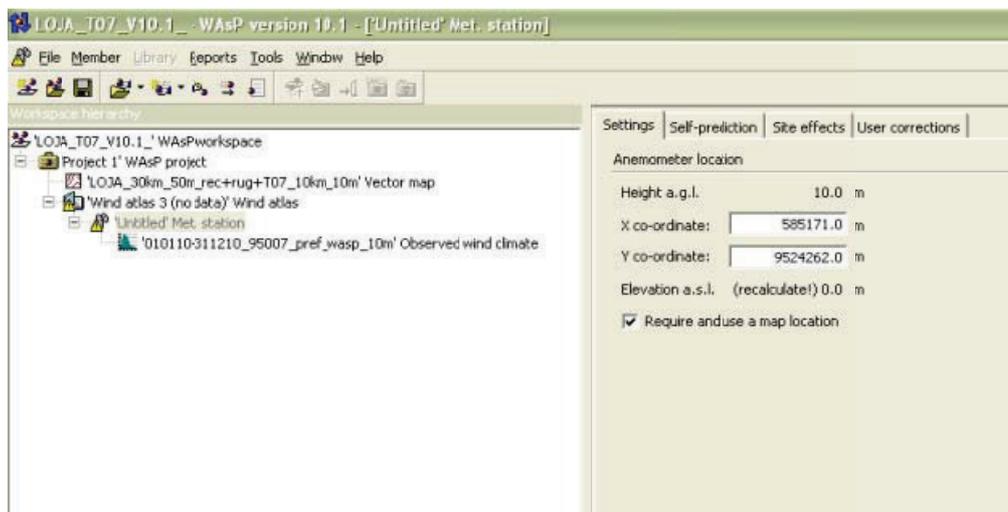
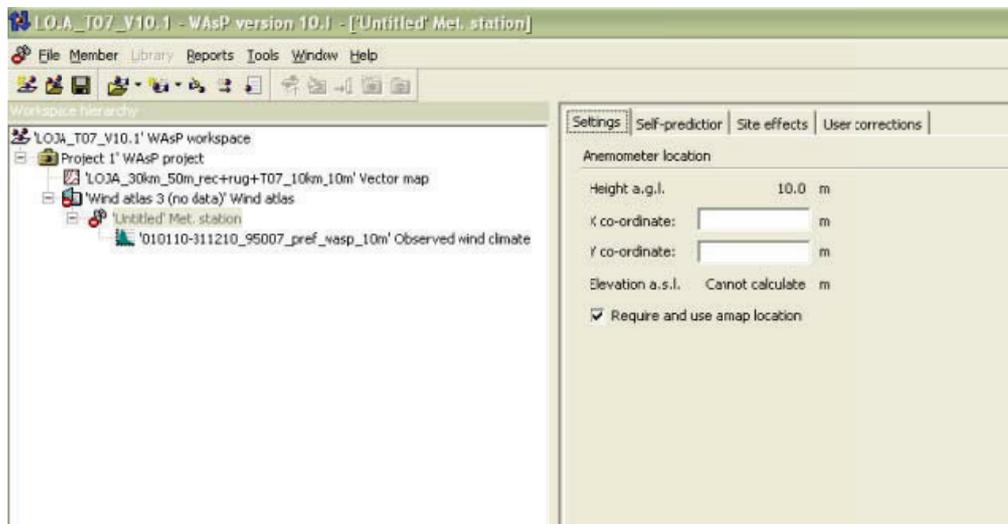




Haciendo doble clic en *.tab se puede visualizar la rosa de frecuencias, el histograma de datos medidos y la distribución Weibull a la cual se ajustan dichos datos.



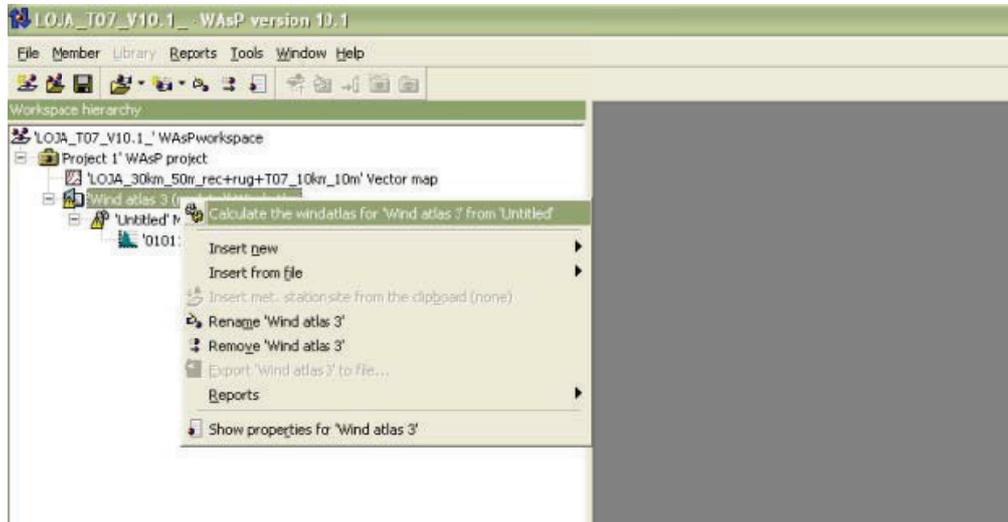
Señal de “prohibido” significa que faltan datos para realizar el cálculo. En este caso es necesario introducir las coordenadas de la estación de medida. Haciendo doble clic en “Met. station” se abre la siguiente ventana.



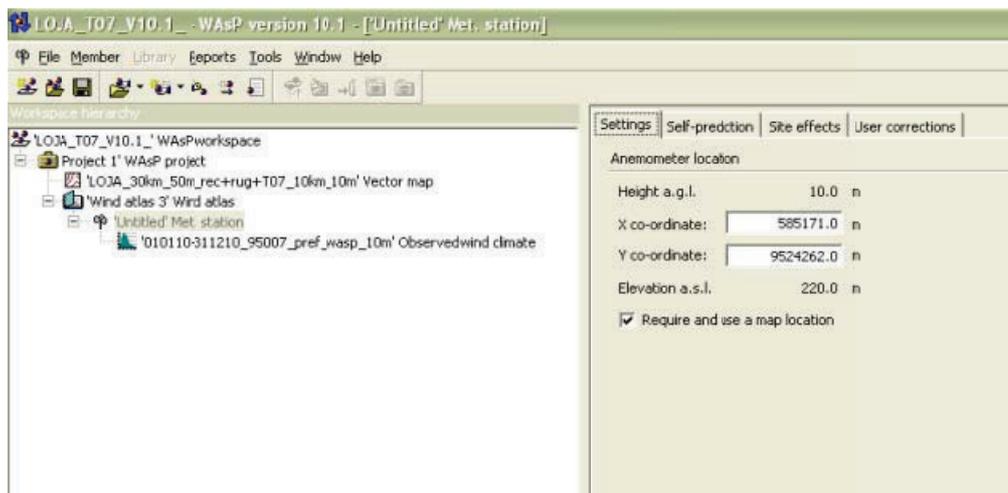
Ahora la señal de “prohibido” ha cambiado a “advertencia” en el “Wind atlas”.

Señal de “advertencia” significa que falta realizar el cálculo.

Para calcular botón derecho sobre “Wind atlas”.

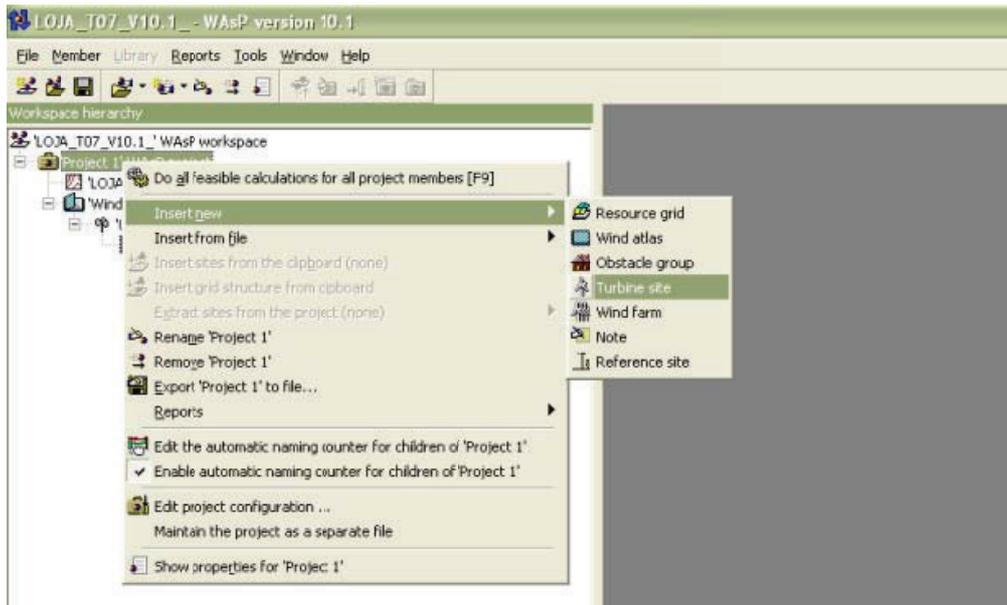


Una vez calculado la señal de “advertencia” desaparece.

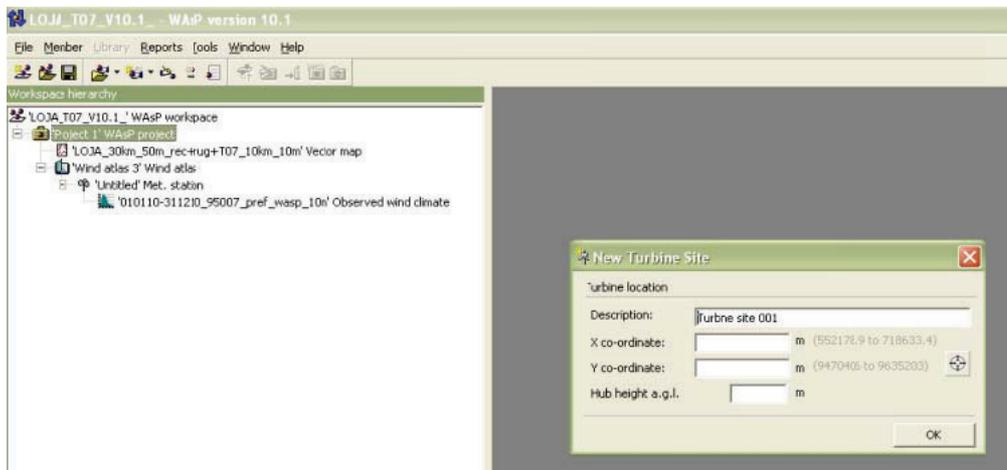


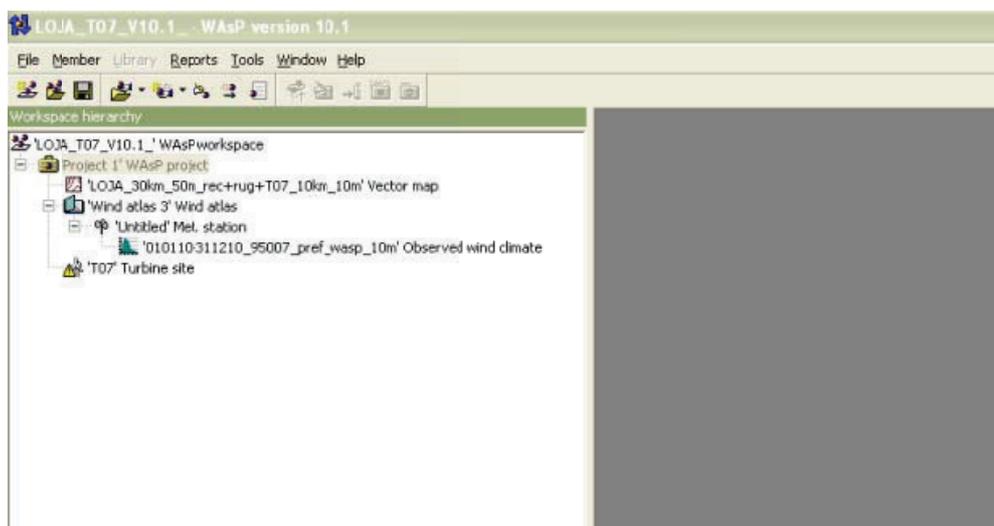
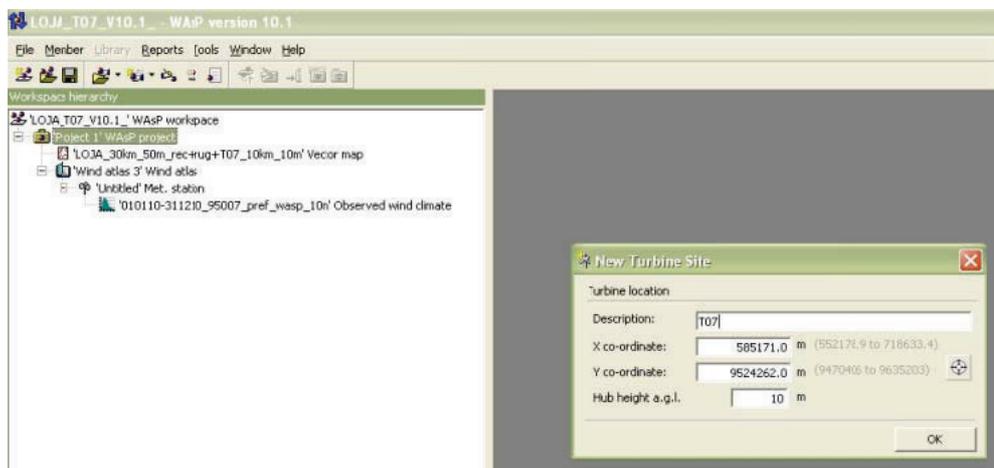
2.4. Introducir “Turbine site”

Para llevar a cabo la calibración del modelo y estimar el error que comete en la simulación es necesario introducir un “Turbine site” en la misma posición que la estación de medida, con el botón derecho sobre “Project”.

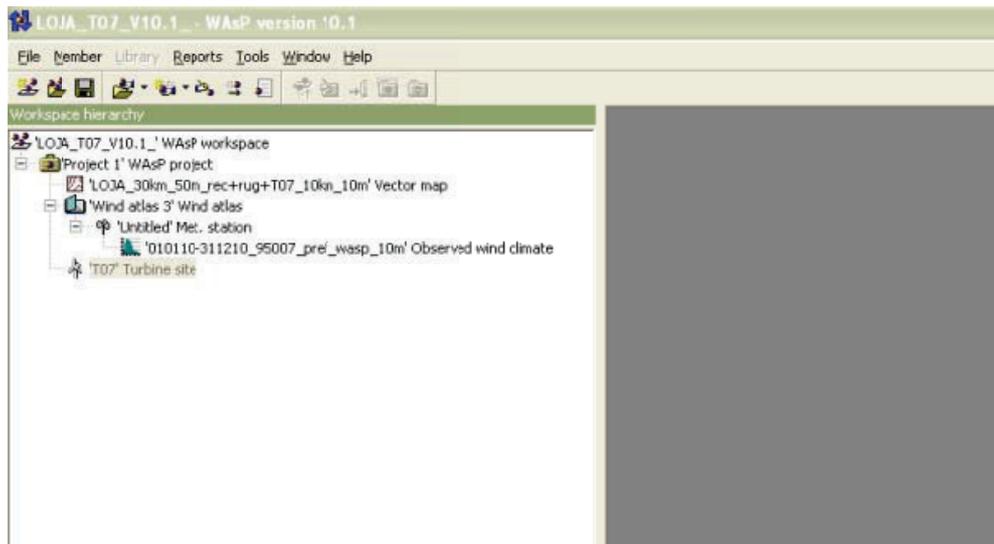
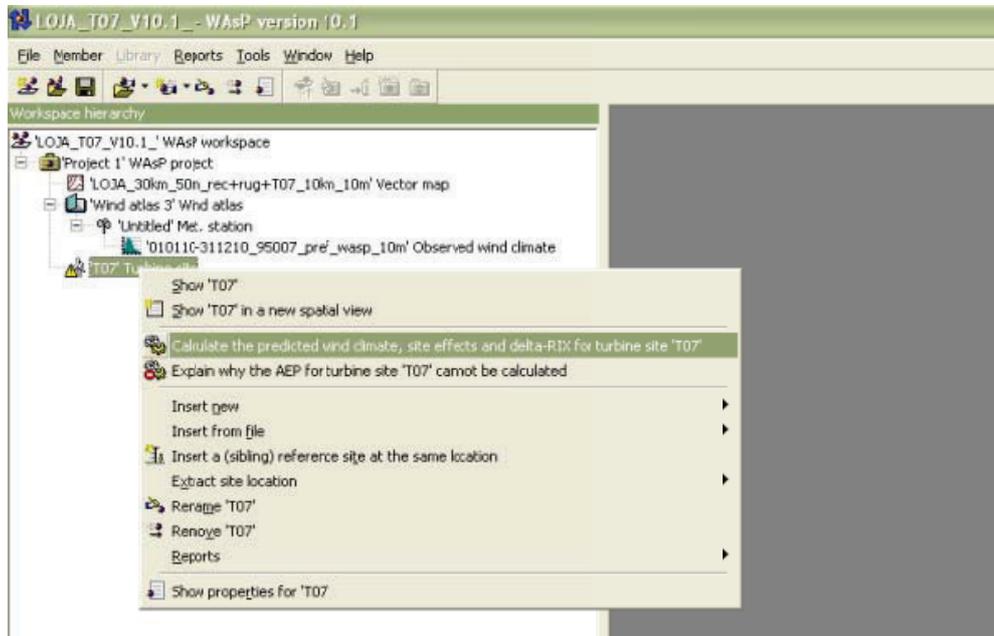


Aparece una ventana donde hay que dar un nombre, las coordenadas y la altura de medida. Todos estos valores son los mismos de la estación meteorológica.

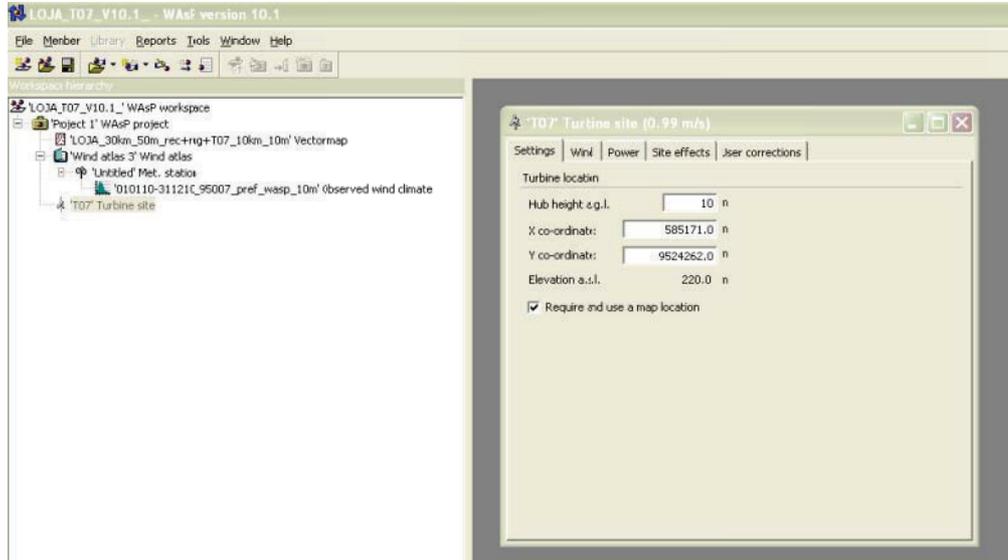




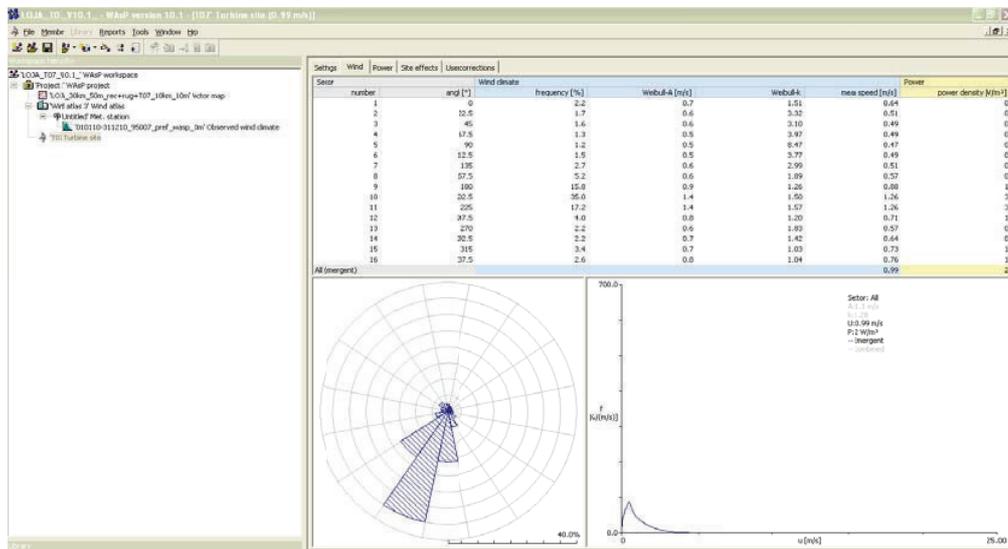
Señal de “advertencia” significa que falta realizar el cálculo.



Hacer doble clic sobre "Turbine site" para ver los resultados del cálculo.



En la pestaña "Wind" se puede observar la velocidad que estima el modelo en la posición de la torre a la altura de medida de 10 m.



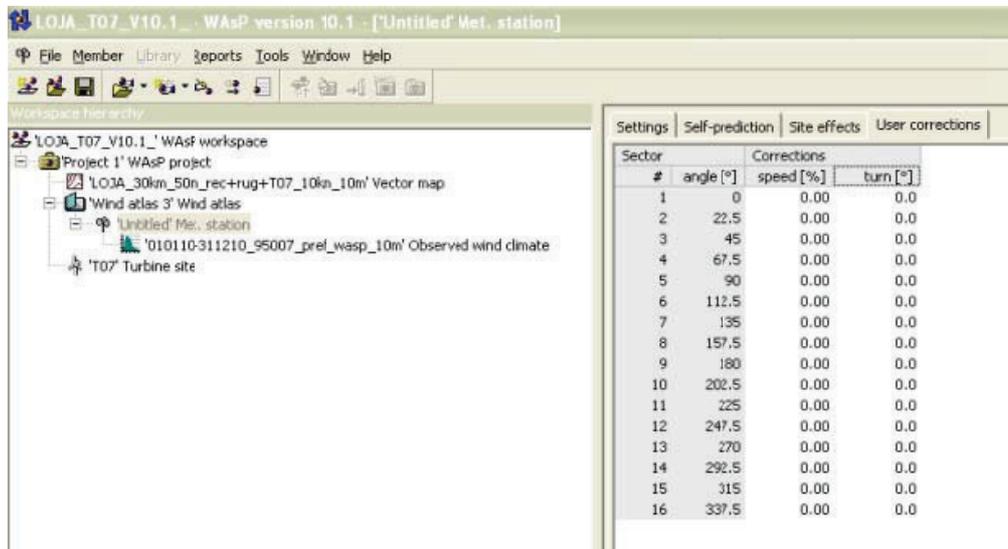
2.4.1. Calibración del modelo

Es necesario comparar la velocidad medida en la estación y la simulada con el programa en la posición de la torre. Así se tiene que:

- Velocidad medida de T07 a 10 m de altura = 0.87 m/s
- Velocidad simulada con WASP en la posición de T07 "Turbine site" a 10 m = 0.99 m/s

Según los resultados, en el caso de la estación meteorológica T07, el modelo sobrevalora la velocidad, por lo que es necesario introducir un factor corrector para obtener en el "Turbine site" la misma velocidad que se mide en la estación T07.

Para ello hay que hacer doble clic en "Met. station" y seleccionar la pestaña "User corrections".



El factor corrector a introducir en la columna speed (%) sería $(0.99/0.87)-1 = 13.79$.

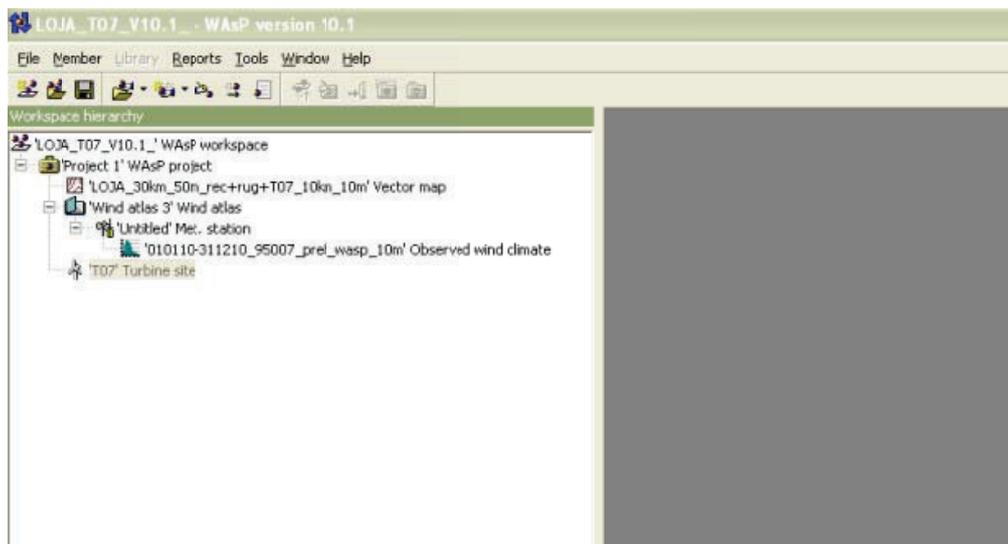
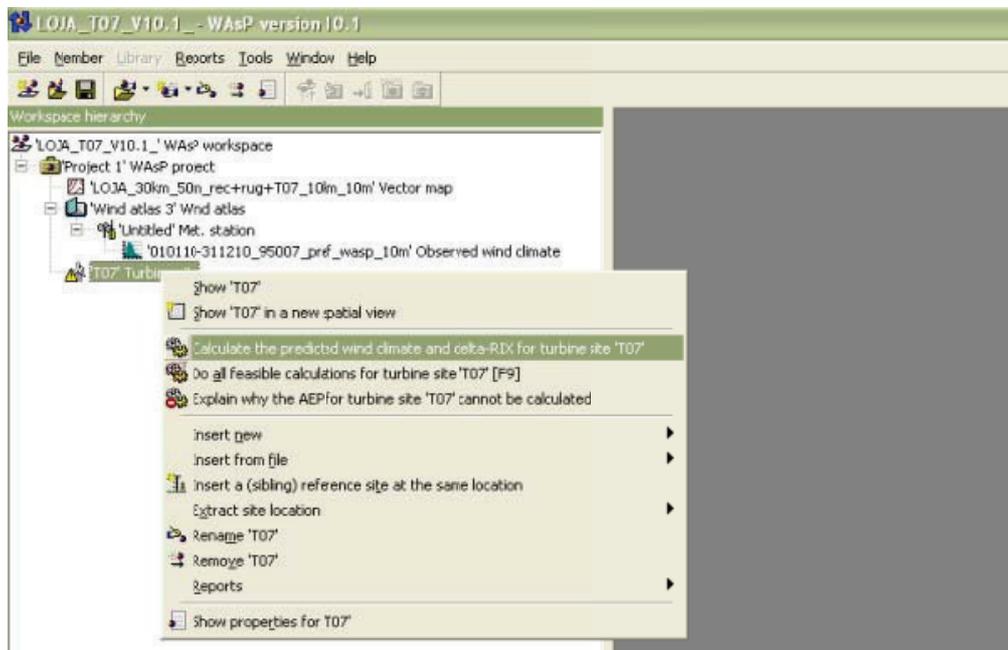
The screenshot shows the WAsP software interface. On the left, the 'Workspace hierarchy' pane displays a tree structure under 'LOJA_T07_V10.1' WASP workspace, including 'Project 1' WASP project, 'LOJA_30km_50m_rec+rug+T07_10km_10m' Vector map, 'Wind atlas 3' Wind atlas, 'Untitled' Met. station, '010110-311210_95007_pref_wasp_10m' Observed wind climate, and 'T07' Turbine site. On the right, the 'Settings' tab is active, showing a table of corrections for 16 sectors.

Sector #	angle [°]	Corrections	
		speed [%]	tun [°]
1	0	13.79	0.0
2	22.5	13.79	0.0
3	45	13.79	0.0
4	67.5	13.79	0.0
5	90	13.79	0.0
6	112.5	13.79	0.0
7	135	13.79	0.0
8	157.5	13.79	0.0
9	180	13.79	0.0
10	202.5	13.79	0.0
11	225	13.79	0.0
12	247.5	13.79	0.0
13	270	13.79	0.0
14	292.5	13.79	0.0
15	315	13.79	0.0
16	337.5	13.79	0.0

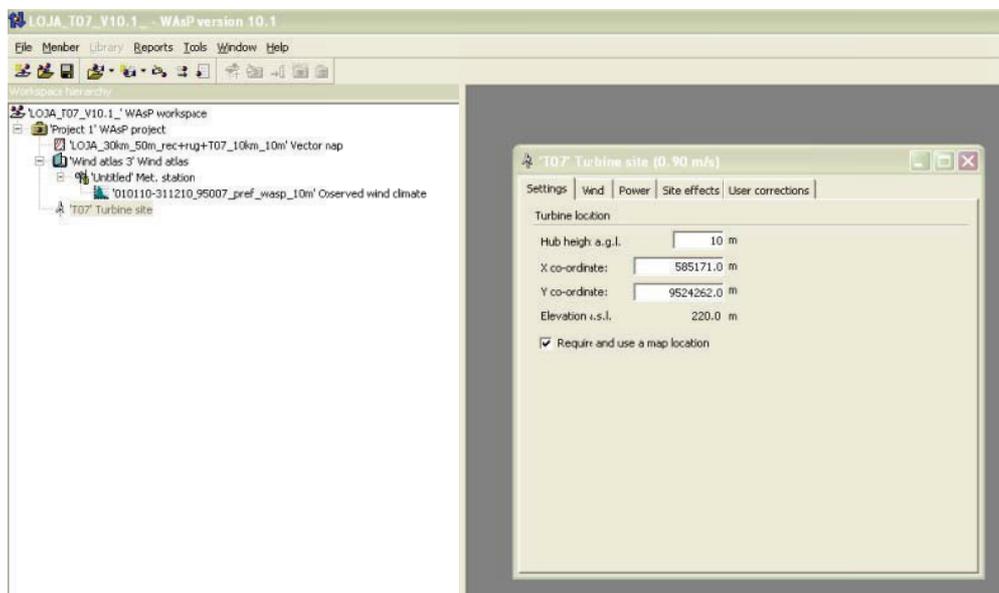
Volver a calcular “Wind atlas” y “Turbine site” con botón derecho.

The screenshot shows the WAsP software interface with a context menu open over the 'Wind atlas 3' item in the workspace hierarchy. The menu options are:

- Show 'Wind atlas 3'
- Calculate the wind atlas for 'Wind atlas 3' from 'Untitled'
- Insert new
- Insert from file
- Insert met. station site from the clipboard (none)
- Rename 'Wind atlas 3'
- Remove 'Wind atlas 3'
- Export 'Wind atlas 3' to file...
- Reports
- Show properties for 'Wind atlas 3'

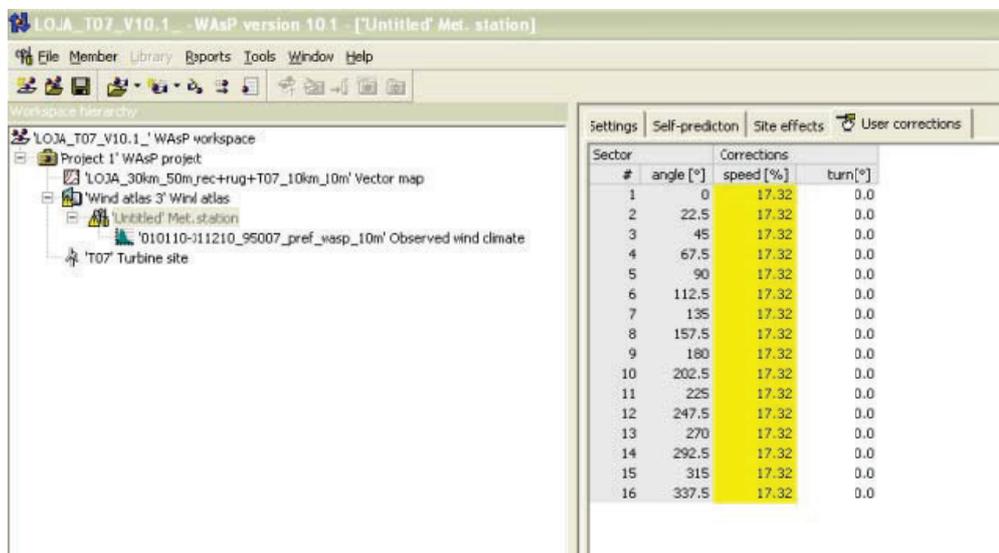


Hacer doble clic en "Turbine site" para ver los resultados del cálculo.

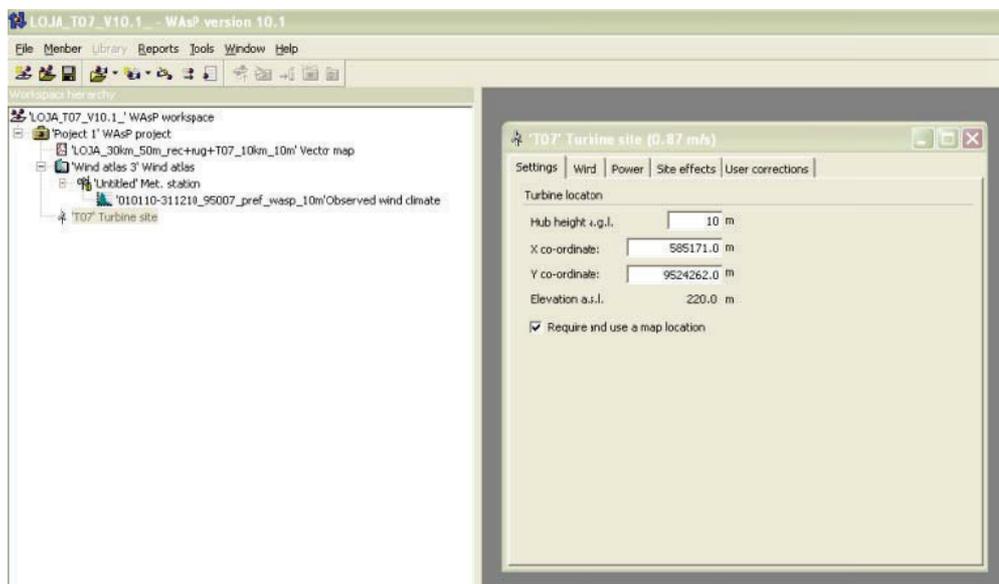


Después de aplicar la corrección en velocidad por el modelo, se tiene una nueva velocidad simulada en el “Turbine site” a 10 m = 0.90 m/s.

Sin embargo la velocidad debería ser 0.87 m/s, es decir hay que seguir disminuyendo la velocidad aumentando el factor corrector, en este caso desde 13.79% hasta 17.32% (valor encontrado mediante prueba-error).



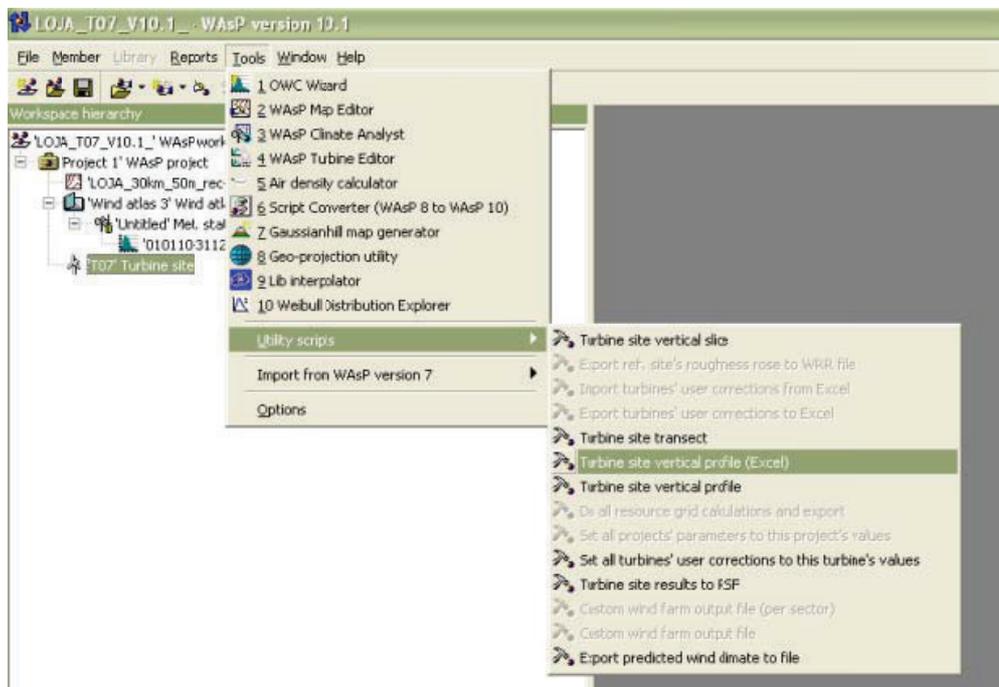
Así repitiendo el proceso se tiene que la velocidad en el “Turbine site” a 10 m coincide con la velocidad medida en la estación T07 y por lo tanto el modelo ya está corregido. Por lo tanto todos los resultados obtenidos a partir de este paso no llevan asociado ningún tipo de error debido al modelo.



2.4.2. Obtención del perfil vertical

A continuación se describe cómo se puede conocer el perfil vertical con el que extrapola el programa WASP.

Para ellos hay que tener seleccionado “Turbine site” y posteriormente seleccionar la opción Tools/Utility scripts/Turbine site vertical profile (Excel).



Automáticamente se abre la Excel y se van completando las celdas, con los valores de velocidad cada 5 m de altura tanto de forma global "All" como por sectores.

The screenshot shows a Microsoft Excel spreadsheet titled "Vertical wind profile report for 'T07'". The spreadsheet contains two tables of data. The first table, starting at row 7, lists wind speed [m/s] for heights from 5m to 100m across 16 sectors. The second table, starting at row 31, lists power density [W/m2] for the same heights and sectors. The data is organized in columns labeled A through R.

Height ag.L [m]	Wind speed [m/s]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
5	0.74026996	0.49928039	0.42532728	0.40745011	0.43056691	0.40226316	0.40770047	0.42265669	0.45534697	0.4747632	0.49645152	0.52546212	0.57119327	0.46791255	0.51395901	0.58219939	0.61675441
10	0.87466498	0.59483037	0.50337279	0.48162037	0.4861318	0.47213881	0.47815227	0.49711805	0.53334522	0.5512159	0.57288158	0.60059976	0.64617328	0.54014816	0.58086968	0.6911087	0.72978147
15	0.95495987	0.6530865	0.54660173	0.52674985	0.5155488	0.5171178	0.5236122	0.54345167	0.58361161	0.6232432	0.651709704	0.68853354	0.72551739	0.58877879	0.6493213	0.76699917	0.79669917
20	1.01394761	0.6956421	0.58222701	0.55983448	0.5471246	0.54044116	0.5560980	0.57716602	0.62065148	0.6276254	0.64403965	0.6726447	0.70278879	0.61977763	0.6845481	0.80702722	0.84725112
25	1.0571289	0.728741	0.60696687	0.58477777	0.58028678	0.57438918	0.581200	0.60307235	0.64909839	0.672734	0.69855707	0.7359343	0.7627788	0.64342737	0.7104029	0.84625053	0.88579929
30	1.09979486	0.7616970	0.63035768	0.60952318	0.60575174	0.59931344	0.6063834	0.62905939	0.6747182	0.69050373	0.71801865	0.75688705	0.78217945	0.66646844	0.730854	0.88472421	0.92428273
35	1.1399729	0.792392	0.65933312	0.63829978	0.63472742	0.62720057	0.6347931	0.65724933	0.7011815	0.71698239	0.74502012	0.78343765	0.80999993	0.68312009	0.7490787	0.91121009	0.95093129
40	1.1651808	0.811874	0.68038383	0.66081271	0.65653902	0.65029713	0.65767650	0.67064024	0.72289068	0.73867326	0.76709813	0.80538993	0.83451811	0.70884196	0.77616332	0.94562739	0.98581257
45	1.1912212	0.8314142	0.6977662	0.67840625	0.6740818	0.66771645	0.6751645	0.6877442	0.74154866	0.75738134	0.7858098	0.82436914	0.85346101	0.714082	0.78202133	0.95939117	1.0105792
50	1.2143921	0.8486638	0.6997289	0.6793918	0.6749729	0.6705732	0.6783113	0.70282781	0.75823492	0.77401507	0.80256356	0.84119078	0.87004823	0.73138016	0.80120207	0.99044237	1.03195822
55	1.2424829	0.8691223	0.7031058	0.68094971	0.6764514	0.6720468	0.6801914	0.70464214	0.77047018	0.78624984	0.81482048	0.8534691	0.88219014	0.7445411	0.8144461	1.01592412	1.05727221
60	1.27017403	0.8878428	0.7189935	0.71274155	0.7102073	0.70457202	0.7125117	0.73647732	0.79486716	0.8106507	0.83920501	0.87775904	0.90632309	0.77575904	0.8457275	1.03831057	1.08059563
65	1.29527164	0.9050318	0.73043549	0.72788686	0.7267166	0.71949881	0.7273524	0.75114167	0.81083375	0.82661719	0.85518119	0.8937456	0.92230914	0.79069883	0.86073745	1.05919021	1.10141718
70	1.32022228	0.9206194	0.74196309	0.7422246	0.7406818	0.73222226	0.7414220	0.7646578	0.8255109	0.84129791	0.86987395	0.90846376	0.9470537	0.81521215	0.88522164	1.07828227	1.12074645
75	1.3456048	0.9352773	0.75686818	0.75597333	0.7535068	0.74619383	0.754819	0.77718002	0.83919603	0.85493132	0.88348468	0.92205447	0.96062428	0.83133236	0.90141515	1.09612811	1.13827295
80	1.36941293	0.9489298	0.77082908	0.76831478	0.7653898	0.75823641	0.7664666	0.78886315	0.85191005	0.86764533	0.89619872	0.93475269	0.97330661	0.84202881	0.91235463	1.11262834	1.15523946
85	1.39181459	0.9614646	0.78388842	0.77995664	0.77673059	0.76949	0.7777212	0.79979163	0.86388863	0.87962494	0.908170884	0.94672668	0.98528108	0.8563016	0.92669678	1.12814438	1.1707567
90	1.41313189	0.9734993	0.79679942	0.79092022	0.7878923	0.77987051	0.7881439	0.81050663	0.87488724	0.89062162	0.91916804	0.95772222	0.99628294	0.86848278	0.93893026	1.14268718	1.18536655
95	1.43337309	0.9846404	0.80851471	0.80129802	0.80225157	0.79267828	0.7979863	0.81973559	0.8852552	0.900966	0.9294728	0.96793709	1.00640152	0.8805917	0.9511264	1.15670002	1.19989464
100	1.45238129	0.9931468	0.81985813	0.81112327	0.81066094	0.79997094	0.8073121	0.82888705	0.89549065	0.91123784	0.9401158	0.97859279	1.01707197	0.89067602	0.9618313	1.16979027	1.21291478

Height ag.L [m]	Power density [W/m2]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
5	0.90880126	0.181009	0.05924607	0.05335823	0.0461254	0.04199871	0.0456668	0.06076986	0.11518572	0.12635036	0.142517173	0.133796751	0.139254627	0.13367227	0.2228227	0.54951036	0.63437909
10	1.35009812	0.2852476	0.09578174	0.08587985	0.0865742	0.08751378	0.0751505	0.09581532	0.13934059	0.1609968	0.19064966	0.190839831	0.25267376	0.18872102	0.3399576	0.7972809	0.9132095
15	1.66641667	0.360770	0.12132808	0.11089402	0.1203421	0.0884133	0.0955403	0.12343244	0.20286294	0.2476953	0.26936975	0.27061753	0.4770851	0.23396668	0.39861123	0.98286204	1.1985413
20	1.91985281	0.4256882	0.14587325	0.1320731	0.1338047	0.10587801	0.11402712	0.1466782	0.23813823	0.2874051	0.30855891	0.282224388	0.76462316	0.262170424	0.44311226	1.14431058	1.28506144

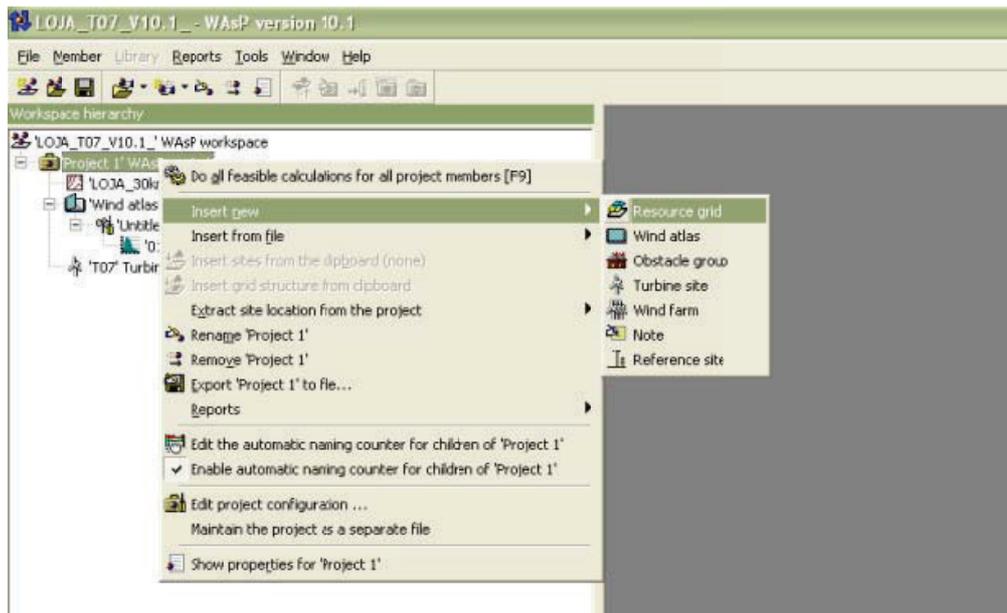
Para obtener el perfil vertical se toman los valores de velocidad que simula WAsP a 10 y 80 m, en este caso 0.87 m/s y 1.36 m/s, y se usa la siguiente fórmula (documento "20130125_Mapa_Eólico_Loja.docx").

$$\alpha = \frac{L_n(v_2/v_1)}{L_n(h_2/h_1)} = \frac{L_n(1.36/0.87)}{L_n(80/10)} = 0.215$$

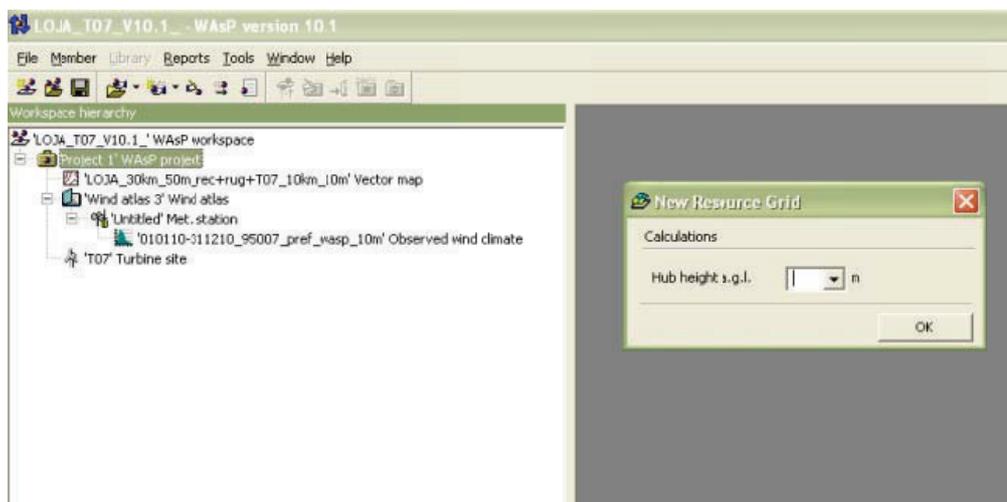
2.5. Introducir un grid

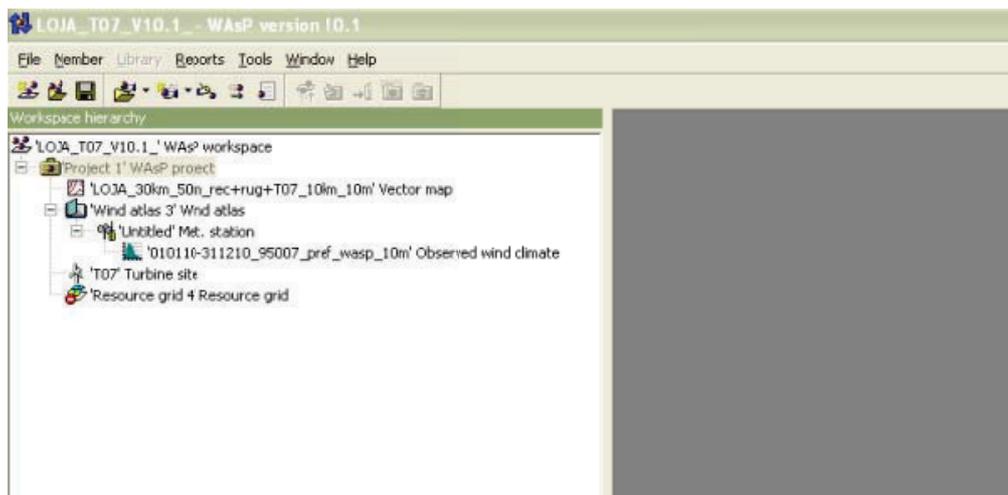
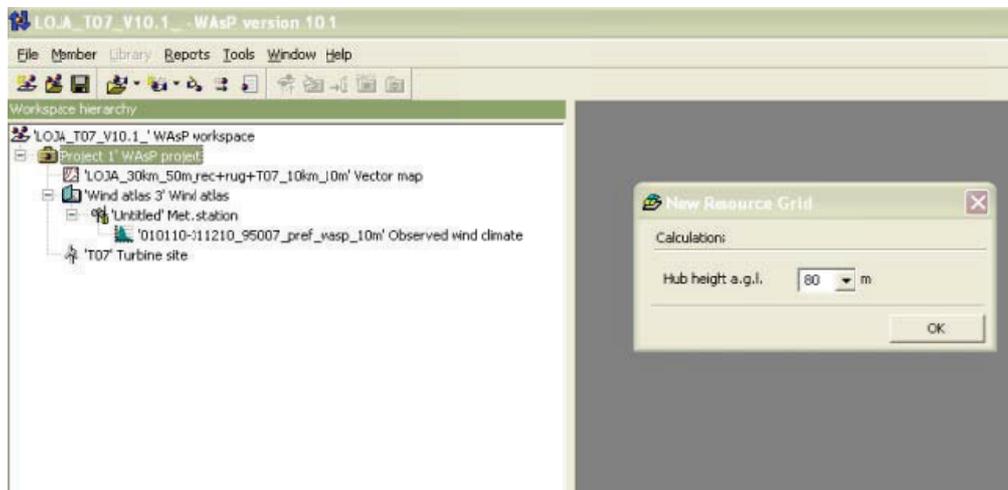
Con el objeto de obtener los resultados de las distintas variables (velocidad media, A y k de la distribución de Weibull, densidad de potencia, etc.) en una malla con una determinada resolución hay que introducir un grid.

Botón derecho en "Project".



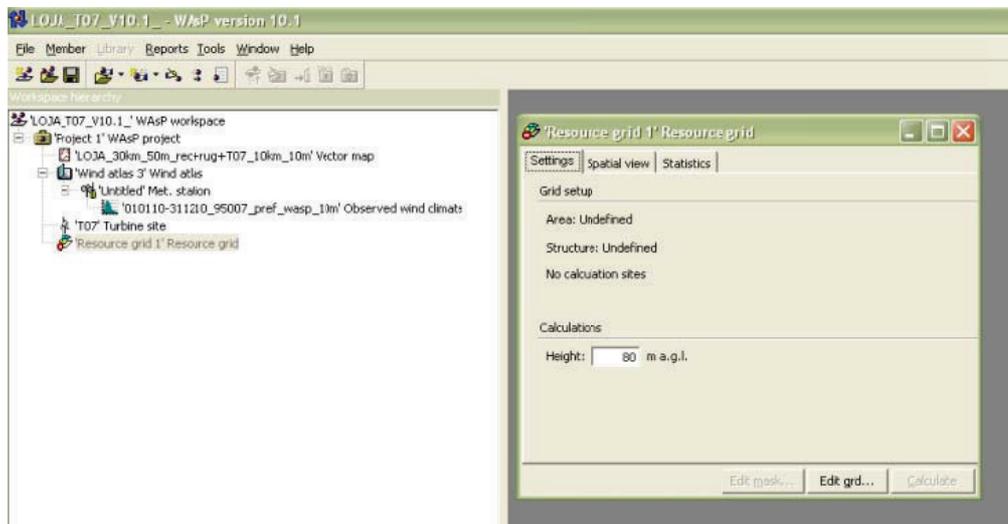
Definir la altura a la que se quieren los cálculos (altura de buje).



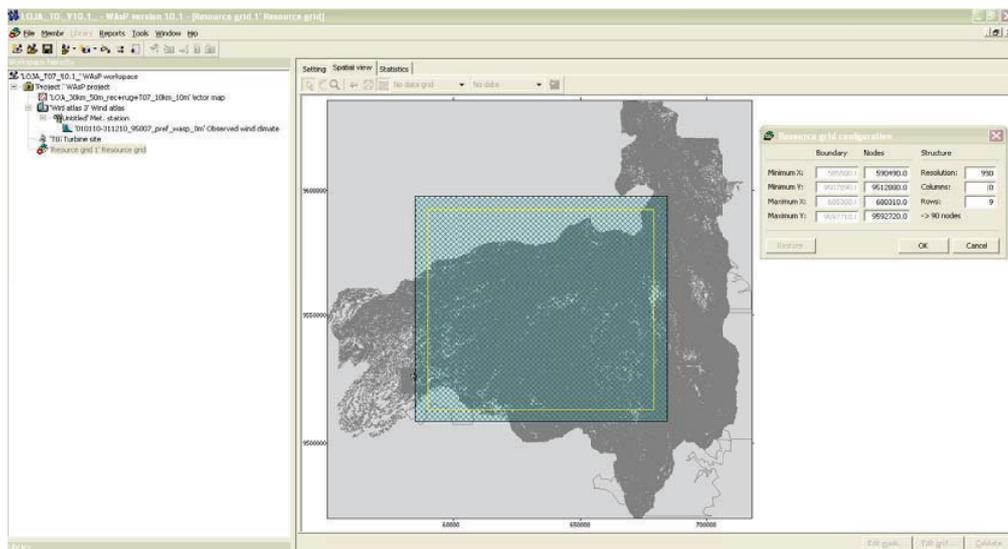


Señal de “prohibido” significa que faltan datos para realizar el cálculo.

Doble clic en “Resource grid” y seleccionar “Edit grid”.

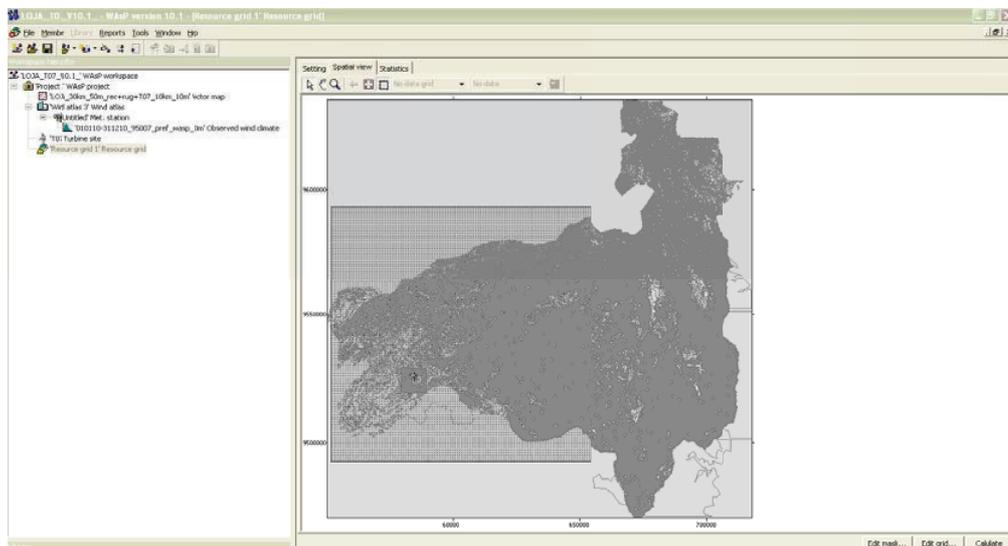
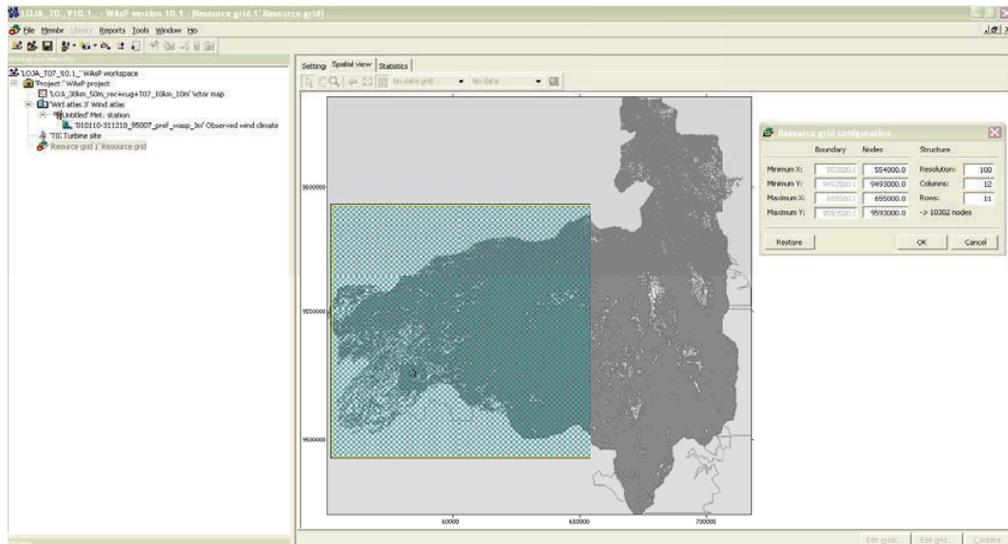


Aparecen ciertos valores por defecto que hay que cambiar, según el interés.

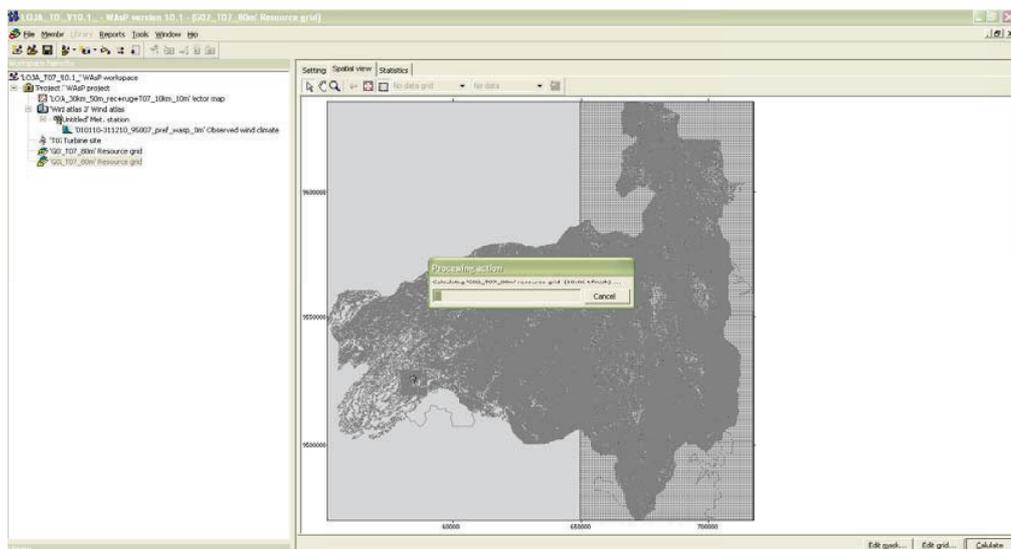
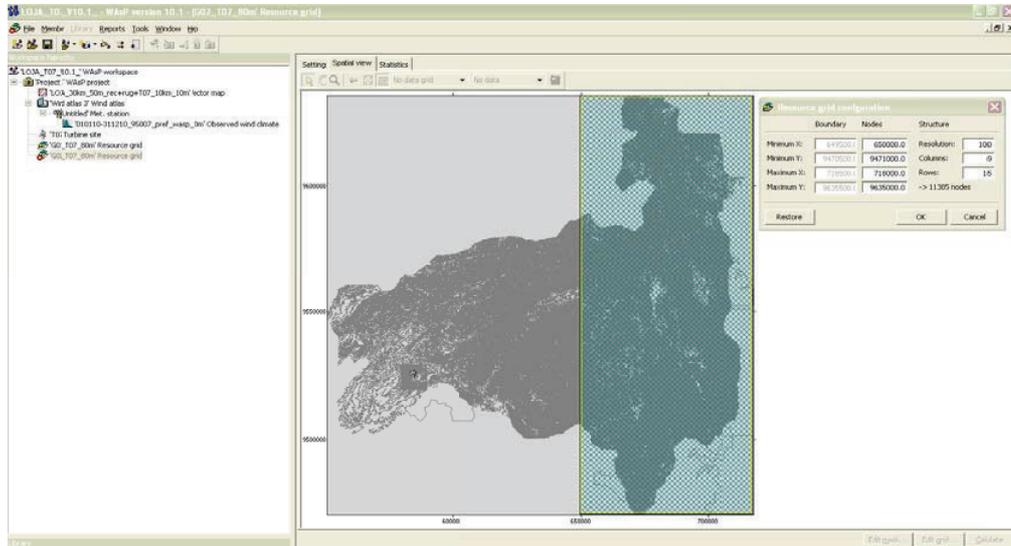


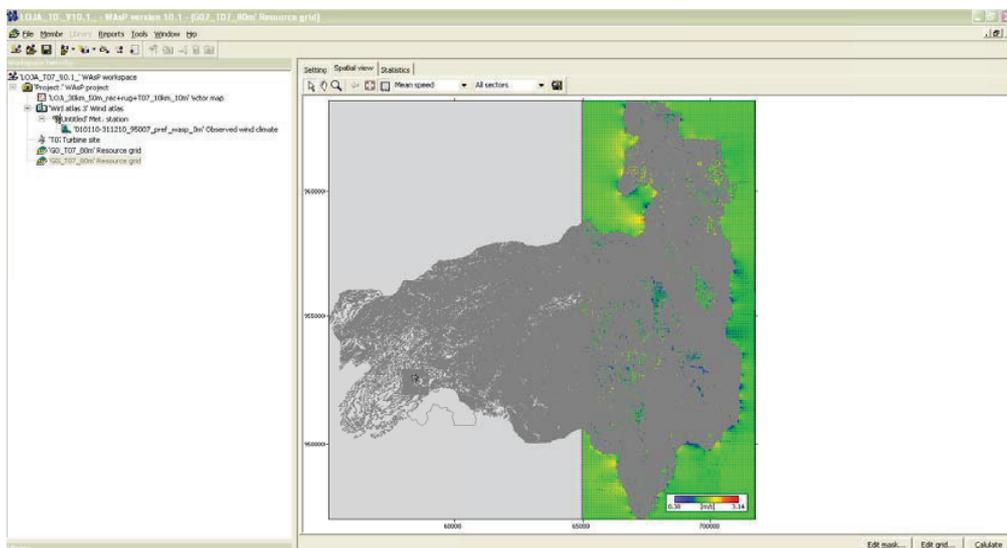
Según viene recogido en el informe “20130125_Mapa_Eólico_Loja.docx”, debido a limitaciones del programa WASP ha sido necesario definir dos mallados con el objeto de cubrir toda la extensión de la provincia de Loja.

Primero hay que definir el tamaño de la celda del mallado (1000 m) y luego la extensión del grid G01 (esquina inferior izquierda y esquina superior derecha).



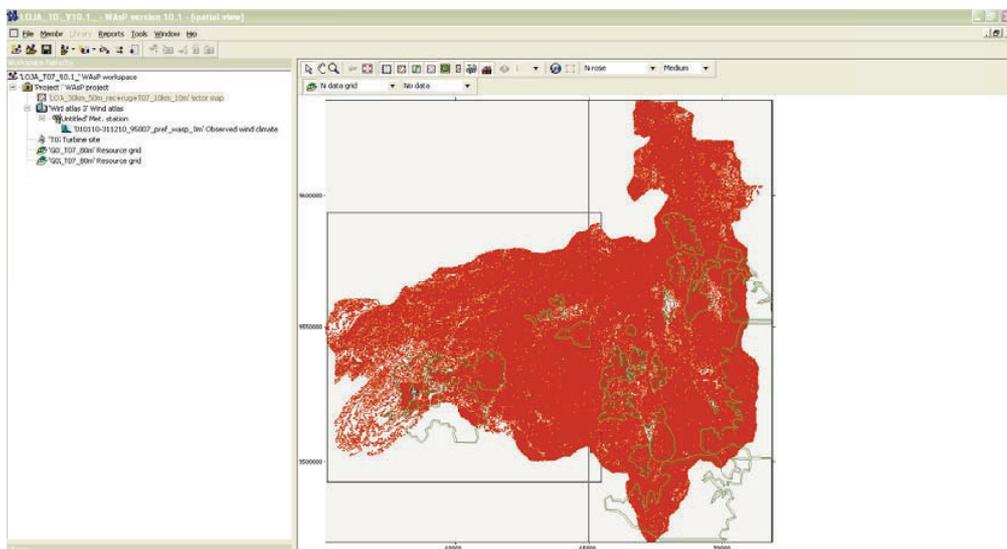
Definir el segundo grid G02, de la misma forma y calcular.



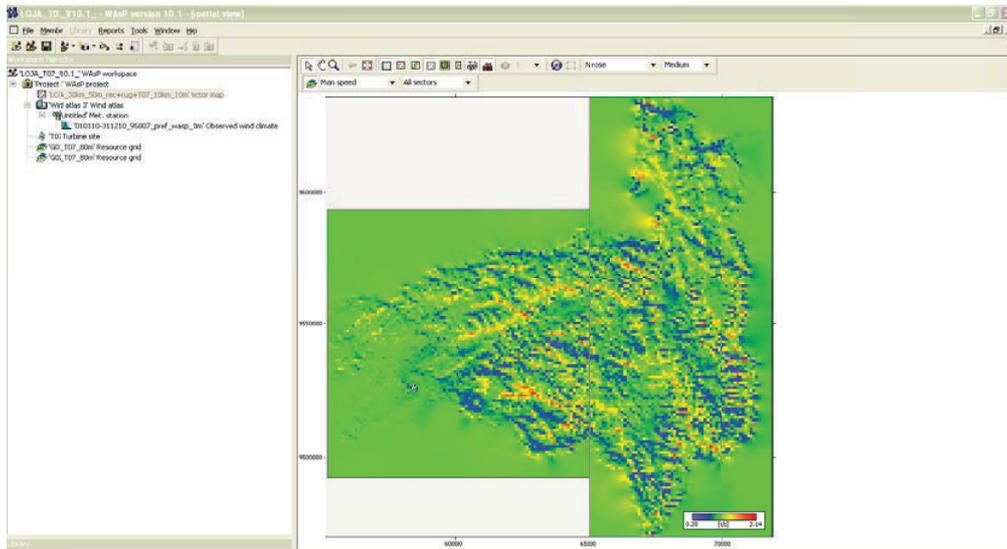


2.6. Proyecto final

Proyecto final con la visualización de las curvas de nivel y de rugosidad y el contorno de los dos mallados calculados. Hacer doble clic en el mapa.



Proyecto final con la visualización de los resultados de velocidad obtenidos de los mallas calculados. Hacer doble clic en el mapa y seleccionar "Mean speed" en el desplegable.

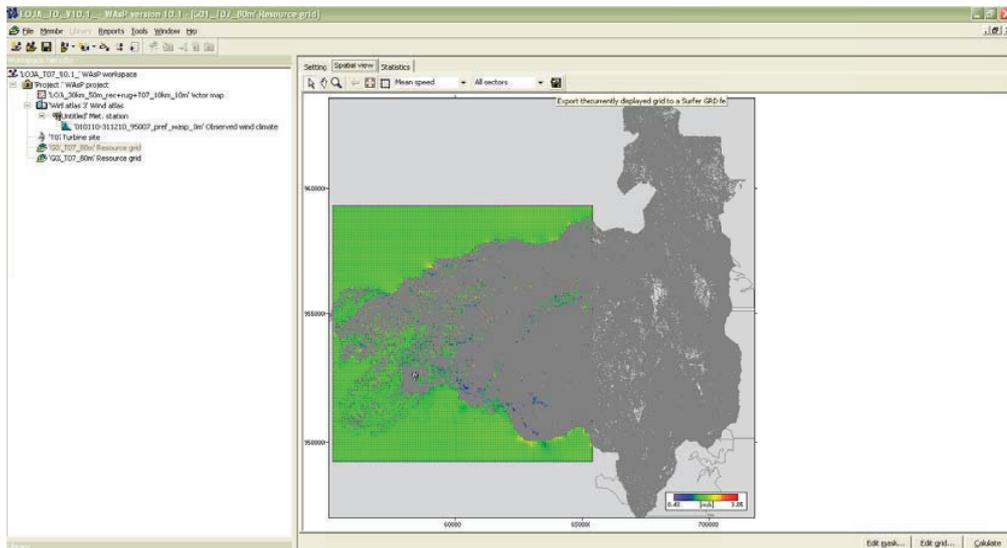


3. RESULTADOS

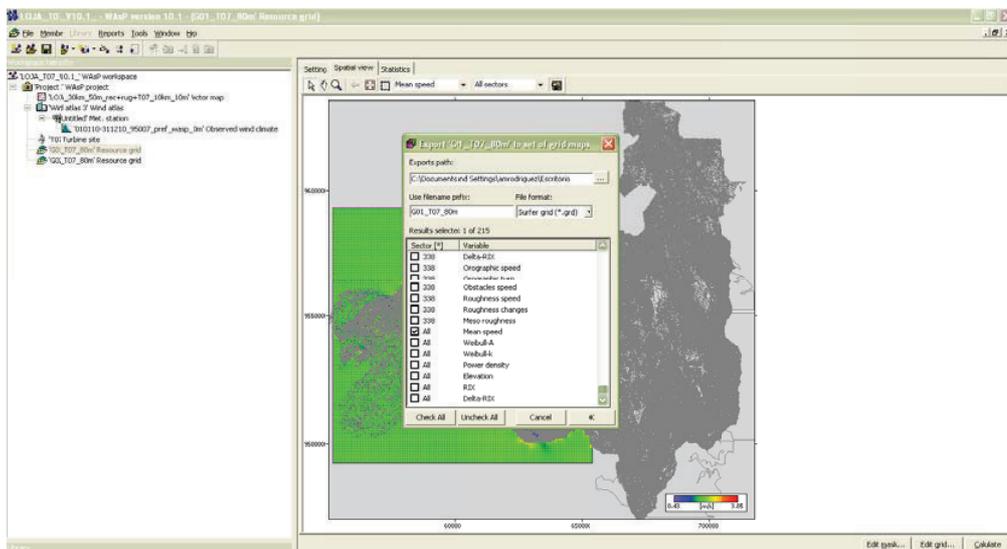
En el siguiente apartado se describe la forma en la que se pueden exportar los resultados del programa WASP para su procesamiento posterior.

3.1. Exportar resultados del grid (fichero *.grid)

Doble clic sobre el grid calculado, en la pestaña “Spatial view” seleccionar la variable a exportar en el desplegable, en este caso “Mean speed” y exportar.

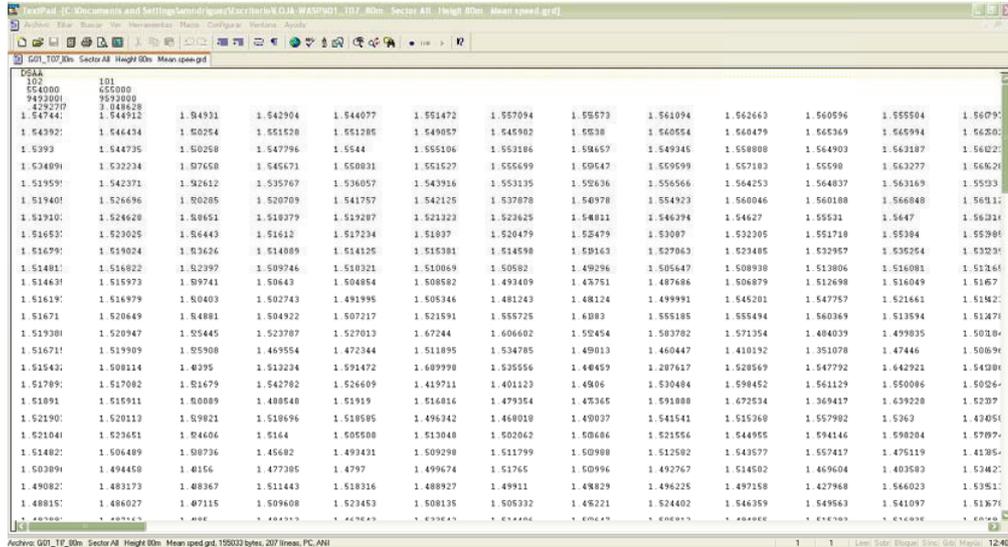


Se abre una ventana en la que es necesario especificar la carpeta donde se quiere que guarde el fichero *.grid, así como el nombre y las variables calculadas.



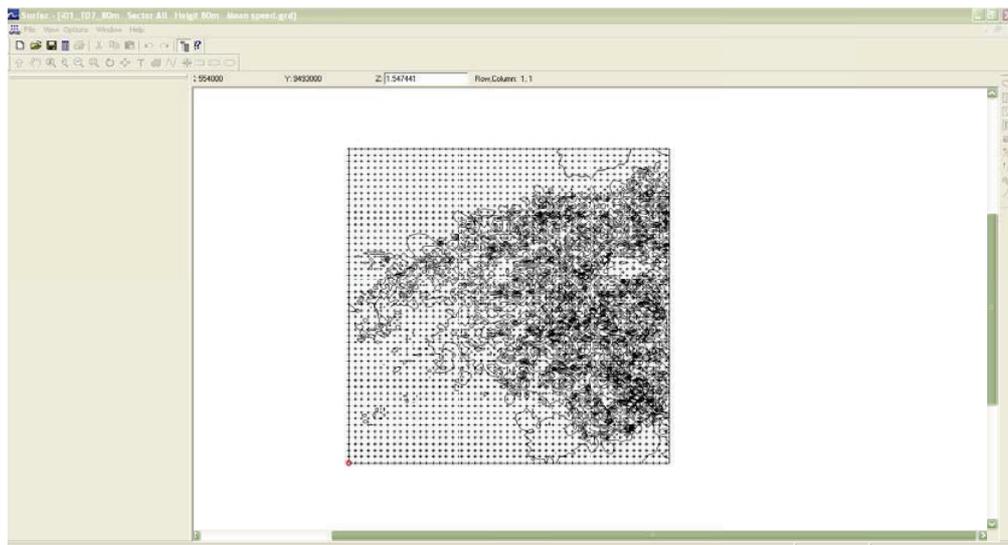
3.2. Procesar el fichero *.gri

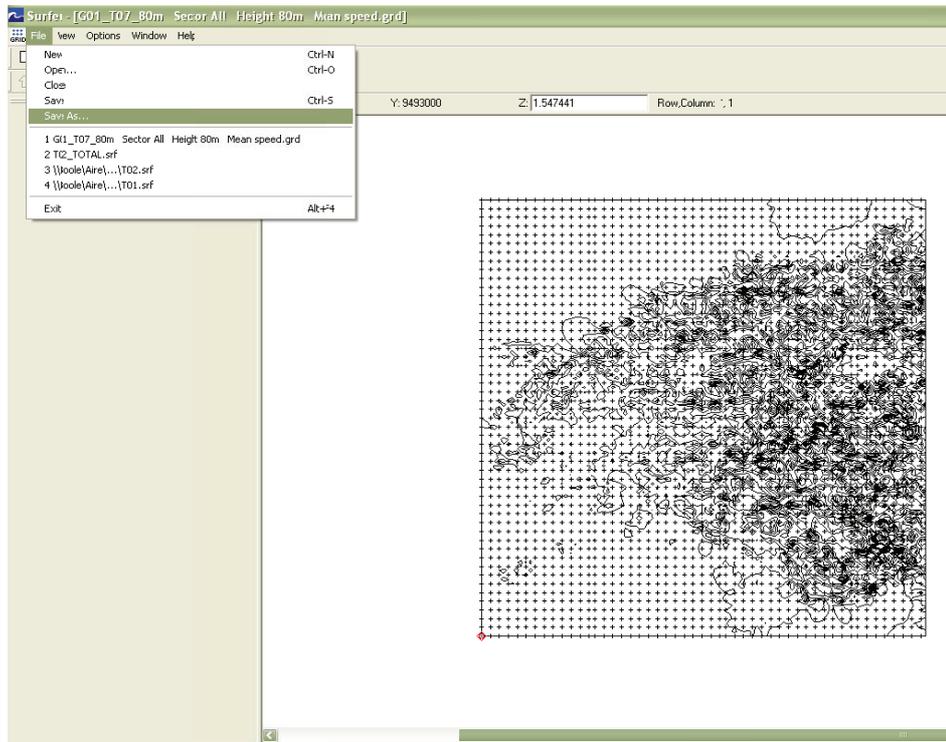
La información contenida en el fichero *.gri se puede visualizar abriéndolo con un editor de texto.



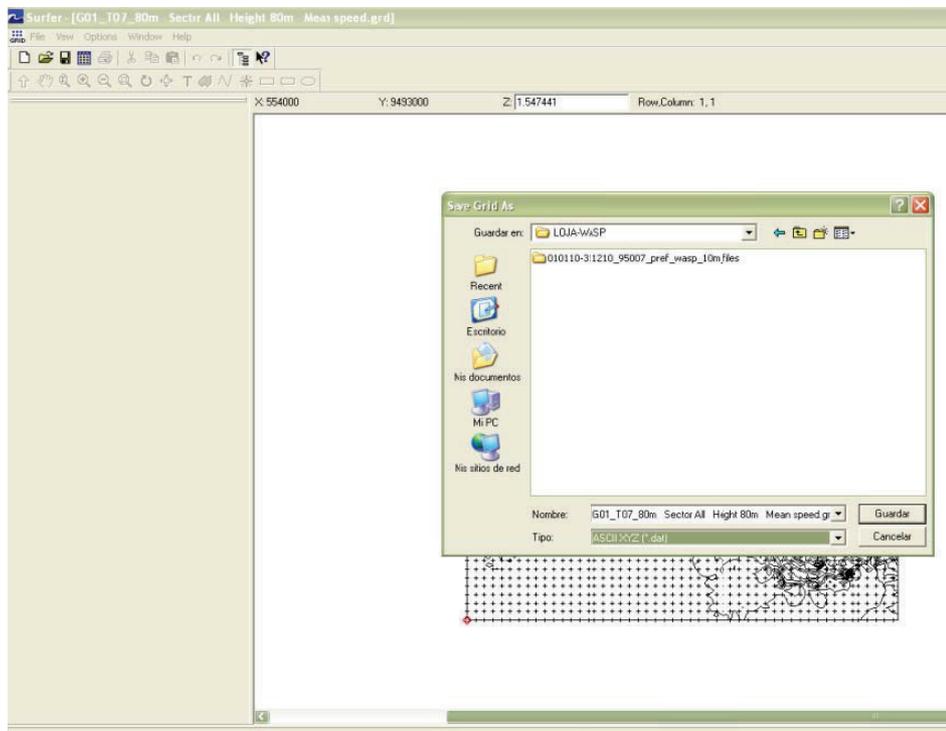
Sin embargo para su posterior procesado es mejor obtener un formato más facil de manejar con Excel. Así que se busca tener tres columnas de datos (xyz), donde “x” e “y” son las coordenadas de cada nodo de la malla y “z” la variable calculada (velocidad media, A y k de la distribución de Weibull, densidad de potencia, etc.).

Para ello es necesario abrir el fichero *.gri con el programa “Surfer” y guardarlo como ASCII XYZ *.dat.





Save the active document with a new name





1859

UNIVERSIDAD NACIONAL DE LOJA

ÁREA DE LA ENERGÍA, LAS INDUSTRIAS Y LOS RECURSOS NATURALES NO RENOVABLES

MAESTRÍA EN ELECTROMECAÁNICA

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

**“Caracterización del Recurso Eólico en la Provincia
de Loja, utilizando modelos computacionales”**

Autor: Ing. Juan Carlos Solano Jiménez.

Noviembre de 2012

Contenido

a. TEMA:.....	3
b. PROBLEMÁTICA	3
ANTECEDENTES.....	3
SITUACIÓN PROBLÉMICA	6
PROBLEMA CIENTÍFICO	6
c. JUSTIFICACIÓN	7
d. OBJETIVOS	9
OBJETIVO GENERAL	9
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	9
HIPÓTESIS.....	9
e. MARCO TEÓRICO.....	10
1. ENERGÍAS RENOVABLES.....	10
1.1. ENERGÍA EÓLICA.....	10
1.1.1. APLICACIONES DE LA ENERGÍA EÓLICA.....	10
1.1.2. ENERGÍA EÓLICA EN ECUADOR.....	11
1.2. POTENCIALIDADES DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES.....	12
2. ESTACIONES METEOROLÓGICAS	13
2.1. ESTACIONES DEL INAMHI.....	13
2.2. METODOLOGÍA USADA POR EL INAMHI.....	14
2.3. INSTRUMENTACIÓN:	15
3. MODELIZACIÓN EÓLICA.....	16
3.1. WAsP.....	17
3.2. MODELOS CFD	18
WINDSIM.....	18
f. METODOLOGÍA.....	19
g. CRONOGRAMA.....	21
h. PRESUPUESTO Y FINANCIAMIENTO	22
i. BIBLIOGRAFÍA.....	24
ANEXOS	25

a. TEMA: Caracterización del Recurso Eólico en la Provincia de Loja, utilizando modelos computacionales.

b. PROBLEMÁTICA

ANTECEDENTES

La Universidad Nacional de Loja como institución de educación superior y de investigación en la Región Sur del Ecuador, considera necesario impulsar acciones específicas para el aprovechamiento de los recursos naturales no renovables, y en base a ello, propiciar la conservación del ambiente.

Uno de los objetivos que la UNL se propuso alcanzar dentro del “Quinto Plan de Desarrollo Institucional 2008 – 2013” señala: *“En lo que se refiere a los requerimientos energéticos de la RSE, la UNL impulsa actividades investigativas orientadas a mejorar técnicas de aprovechamiento de las energías alternativas renovables, como la solar, eólica, hidráulica, y la procedente de biomasa. La Institución contribuye también en la socialización de metodologías para la gestión energética, es decir, la búsqueda de mayor eficiencia en el uso de la energía, principalmente eléctrica y térmica.”*

Actualmente la UNL tiene en marcha el Proyecto 754 denominado “Desarrollo de modelos espacio temporales para estimar el potencial solar y eólico en la Región Sur del Ecuador”, co – financiado por la SENESCYT, con un valor de USD 144,102.08, y un aporte institucional de la UNL de USD 16,011.34. Este proyecto se viene ejecutando con normalidad desde julio 2011, y se prevé culminar en junio de 2013. El Director del proyecto es el Ing. Thuesman Montaña, y dentro del equipo de investigación se encuentran el Ing. Jorge Maldonado, la PhD. Emmanuelle Quentin y mi persona.

Los resultados del proyecto 754, contribuirán significativamente al desarrollo de nuevos proyectos orientados a la utilización de energías renovables en la Región Sur del Ecuador (Solar térmica, solar fotovoltaica, eólica).

Se elaborará metodologías geomáticas para obtención de mapas de toda la RSE, con el fin de obtener en cada punto geográfico la información de la radiación solar y velocidad del viento, a nivel espacio - temporal.

Esto se realizará básicamente de dos fuentes:

1. Datos puntuales (estaciones meteorológicas), y
2. Mapas satelitales.

Estos mapas determinarán qué sitios de la RSE cuentan con buen potencial, y se escogerán con evaluación multicriterios los lugares en donde se ubicarán las estaciones meteorológicas.

A nivel nacional, el INAMHI es el Servicio Meteorológico e Hidrológico del Ecuador creado por Ley, como una necesidad y un derecho fundamental de la comunidad, con capacidad y la obligación de suministrar información vital sobre el tiempo, el clima y los recursos hídricos del pasado, presente y futuro, que necesita conocer el país para la protección de la vida humana y los bienes materiales. El INAMHI, envió una carta de auspicio a la UNL, indicando que ayudará con la entrega de información necesaria de estaciones meteorológicas para que el proyecto 754 cumpla sus objetivos.

En noviembre de 2011, la Oficina de Cooperación de la Embajada de Bélgica en Ecuador CTB, lanzó una convocatoria pública de un PROGRAMA DE BECAS dirigido a las Universidades y Escuelas Politécnicas del Ecuador, para capacitación de docentes e investigadores que requieran profundizar su formación en un campo. En abril de 2012, recibimos la comunicación por parte de la CTB, en la que se manifestaba que la propuesta presentada por los Ingenieros Jorge Maldonado y Juan Carlos Solano ha sido calificada y se logró que el curso sea dictado por el CENTRO DE INVESTIGACIÓN DE RECURSOS Y CONSUMOS ENERGÉTICOS CIRCE de la Universidad de Zaragoza de España, quienes gozan de una dilatada experiencia y reconocimiento internacional en el campo de las energías renovables. A finales del mes de Octubre de 2012, el Profesor Carlos Pueyo Rufas, dictó un curso denominado "APLICACIÓN DE SISTEMAS DE MEDICIÓN REMOTA, GENERACIÓN DE MAPAS Y APLICACIÓN DE SOFTWARE EN PROYECTOS CON FUENTES RENOVABLES DE ENERGÍA", que se centró en el

aprovechamiento de la energía eólica, y servirá de base para futuros proyectos presentados en este campo.

En base a todo lo expuesto, planteo como proyecto de investigación la generación de un mapa para la caracterización del recurso eólico en la provincia de Loja, con la utilización de modelos computacionales, utilizando como base los datos de estaciones meteorológicas del INAMHI, ubicadas en distintos sectores de la Provincia de Loja. Este proyecto de investigación será de vital importancia para poder cumplir la Actividad 2.1 del proyecto 754 que versa “Desarrollar metodologías de procesamiento de datos puntuales (estaciones meteorológicas), que permitan métodos confiables de interpolación de datos en la RSE”.

Dentro de la justificación presentada en el proyecto 754 a la SENESCYT, se plantea la ejecución de un proyecto de investigación dentro del programa de la Maestría en Electromecánica que la UNL tiene actualmente.

Objeto de Investigación

El potencial Eólico

Campo de Acción

El potencial Eólico en la Provincia de Loja.

Unidades de observación

- Medición de variables (velocidad y dirección del viento) en distintos lugares de la Provincia de Loja.
- Monitoreo, transmisión, recepción y análisis de las variables medidas.
- Validación de datos de las estaciones meteorológicas en la Provincia de Loja.
- Modelo del potencial eólico.
- Metodología para un ulterior uso en otros sectores.
- Aprovechamiento de energías alternativas renovables.

SITUACIÓN PROBLÉMICA

En la Región Sur del Ecuador no existe una institución ni pública ni privada que proporcione información sobre la situación climática y datos sobre el potencial eólico y solar en una localidad específica. El INAMHI brinda datos de estaciones meteorológicas, pero no elabora un modelo de interpolación para otros sectores inclusive cercanos a éstas.

Es necesaria la investigación en este campo, y la ejecución de un proyecto que tenga como meta la elaboración de una metodología para el monitoreo del potencial eólico en la Provincia de Loja, y en base a los datos adquiridos, ya sea por estaciones meteorológicas o bases de datos mundiales, elaborar un modelo que emplee algún tipo de formulismo matemático para expresar relaciones, proposiciones sustantivas de hechos, variables, parámetros, entidades y relaciones entre variables, para estudiar comportamientos del sistema complejo ante situaciones difíciles de observar en la realidad, que permita el posterior uso de las energías renovables en lugares de la provincia de Loja que no cuenten con energía eléctrica convencional. Esta metodología permitirá un posterior estudio del Potencial Eólico en toda la Región Sur del Ecuador.

Actualmente, el MEER (Ministerio de Electricidad y Energía Renovable), a través del INER (Instituto Nacional de Energía Renovable), está próximo a publicar un mapa eólico de todo el Ecuador. Sin embargo, el presente tema de investigación no implicaría una duplicidad investigativa, sino mas bien, sería una herramienta para contrastar resultados, debido a que el mapa eólico del Ecuador utiliza modelos de meso escala (imágenes satelitales) para su desarrollo, mientras que el presente proyecto utilizará datos puntuales (estaciones meteorológicas).

PROBLEMA CIENTÍFICO

¿Es posible elaborar un modelo computacional utilizando datos de estaciones meteorológicas, que permita conocer el potencial uso del recurso eólico en la Provincia de Loja?

c. JUSTIFICACIÓN

El presente proyecto de investigación intenta contribuir con información cualitativa del recurso eólico en la Provincia de Loja, para proyectos de desarrollo en energías renovables, de tal forma que instituciones públicas o privadas, Universidades, Consejos Provinciales, Municipios u otros interesados puedan acceder a dicha información.

Si bien es cierto el INAMHI recopila información sobre sus estaciones meteorológicas ubicadas a lo largo de todo el país, y por lo tanto en la provincia de Loja, esta información es proporcionada en forma de anuarios con datos promediados mensuales, y solamente sirven para lugares cercanos a la estación (10 Km a la redonda aproximadamente). Cuando se necesita una información más exacta en otros lugares en donde se cuenta con estaciones, estos datos ya no sirven, y es necesaria la interpolación con modelos matemáticos, además de utilizar datos de satélites para realizar una metodología confiable que brinde esta información.

De lo investigado hasta la presente fecha, no existe en el Ecuador Organismo que provea con la información que se pretende, así que la relevancia y trascendencia social es muy importante, debido a que los ingenieros, agricultores, u organismos cuenten con estos datos para diseñar proyectos de energías renovables, básicamente en potencialidades eólicas, y no requieran utilizar instrumentos de medición o estaciones meteorológicas temporales para obtener la información que necesitan.

Las aplicaciones prácticas que se podrían realizar con la utilización del proyecto son las siguientes: Acondicionamiento y ahorro de energía en edificaciones, bombeo de agua, sistemas eléctricos aislados, Comunicación, Sistemas eléctricos conectados a la red, etc. En nuestro país las energías renovables están tomando poco a poco vigencia e importancia, así que un proyecto de este tipo sería muy útil para todos.

La investigación necesitará constatar si los datos obtenidos hasta la presente fecha por el INAMHI, su metodología, sus fórmulas matemáticas, modelos e instrumentos

de medición, sean correctos y con alta confiabilidad, en caso de no ser así la investigación tendrá aún más relevancia para elaborar nuevas metodologías teóricas y prácticas para obtener márgenes de error tolerables en los datos.

El asesoramiento del presente proyecto, estará a Cargo de los Ingenieros Jorge Maldonado y Edwin Pacccha, quienes gozan de una gran experiencia en el manejo de software para modelación del recurso eólico, y sus maestrías fueron orientadas en este campo. Además, mediante el convenio firmado entre la Universidad de Zaragoza y la Universidad Nacional de Loja, se tiene el apoyo incondicional del Profesor Carlos Pueyo, en el asesoramiento de la tesis.

Inicialmente se pretende realizar este proyecto la Provincia de Loja, y cuando se obtenga los resultados esperados, podrá utilizarse esta metodología para un ulterior uso en toda la RSE e inclusive en todo el territorio ecuatoriano.

A futuro pueden surgir ideas, recomendaciones o nuevas hipótesis que permitan aumentar el proyecto a un nivel de prestigio internacional, con bases de datos sumamente confiables en climatología, mapas eólicos, y con supercomputadoras que modelen el clima y permitan su proyección en el futuro, innovando en conceptos nuevos investigados e inclusive creando nuevos instrumentos para la medición de variables existentes en el clima.

Se pretende con el presente proyecto utilizar los recursos de la Universidad Nacional de Loja, en base a convenios con otras instituciones como el MEER, la SENACYT, el INAMHI, etc., quienes aportarán además de recursos económicos, recursos bibliográficos y bases de datos que permitan una mejor realización del proyecto.

El tiempo destinado será de seis meses a partir de su aprobación. Por último, la investigación que se realice en este proyecto, cumplirá con los objetivos de la Maestría en Electromecánica que se plantearon al inicio de la misma.

d. OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Elaborar un modelo en un software computacional que permita obtener información confiable sobre la energía eólica en la Provincia de Loja, en base a los datos obtenidos de estaciones meteorológicas.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Obtener datos de velocidad y dirección del viento de estaciones meteorológicas instaladas en la Provincia de Loja.
2. Elaborar un modelo utilizando un software computacional que permita la interpolación de los datos obtenidos para toda la Provincia de Loja.
3. Elaborar una metodología que permita el ulterior uso del modelo matemático en otras zonas de la Región Sur del Ecuador.

HIPÓTESIS

El modelo permitirá obtener datos de velocidad y dirección del viento en la Provincia de Loja, con una confiabilidad mayor al 85%.

e. MARCO TEÓRICO

1. ENERGÍAS RENOVABLES

Se denomina **energía renovable** a “la energía que se obtiene de fuentes naturales virtualmente inagotables, unas por la inmensa cantidad de energía que contienen, y otras porque son capaces de regenerarse por medios naturales”. (García, 2006)

Una fuente de energía alternativa es aquella que puede suplir a las energías o fuentes energéticas actuales, ya sea por su menor efecto contaminante, o fundamentalmente por su posibilidad de renovación.

1.1. ENERGÍA EÓLICA

Es la energía obtenida del viento, es decir, la energía cinética generada por efecto de las corrientes de aire, y que es transformada en otras formas útiles para las actividades humanas.

El término eólico viene del latín Aeolicus, perteneciente o relativo a Eolo, dios de los vientos en la mitología griega. La energía eólica ha sido aprovechada desde la antigüedad para mover los barcos impulsados por velas o hacer funcionar la maquinaria de molinos al mover sus aspas.

En la actualidad, la energía eólica es utilizada principalmente para producir energía eléctrica mediante aerogeneradores. “A finales de 2007, la capacidad mundial de los generadores eólicos fue de 94.1 GW”. (WORLD ENERGY COUNCIL, 2007).

“La energía eólica es un recurso abundante, renovable, limpio y ayuda a disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero al reemplazar termoeléctricas a base de combustibles fósiles, lo que la convierte en un tipo de energía verde.” (BUN-CA, 2002)

1.1.1. APLICACIONES DE LA ENERGÍA EÓLICA

Al ser una energía limpia, que no produce emisiones atmosféricas ni residuos contaminantes, no requiere una combustión que produzca dióxido de carbono (CO₂), por lo que no contribuye al incremento del efecto invernadero ni al cambio climático.

Puede instalarse en espacios no aptos para otros fines, por ejemplo en zonas desérticas, próximas a la costa, en laderas áridas y muy empinadas para ser cultivables.

Su inclusión en un sistema interconectado permite, cuando las condiciones del viento son adecuadas, ahorrar combustible en las centrales térmicas y/o agua en los embalses de las centrales hidroeléctricas.

Sus principales aplicaciones son:

- Bombeo de agua
- Aplicaciones térmicas
- Sistemas eléctricos aislados
- Sistemas individuales
- Sistemas centralizados
- Sistemas híbridos
- Sistemas eléctricos conectados a la red

1.1.2. ENERGÍA EÓLICA EN ECUADOR

El primer parque eólico del país se inauguró en octubre del 2007 en la isla San Cristóbal del Archipiélago de Galápagos, con una potencia instalada de 2,4 MW. Y se espera que en 2010 esté en operación un segundo parque eólico ubicado en otra de las islas del Archipiélago de Galápagos, proyecto Baltra – Santa Cruz, con una potencia instalada de 3,2 MW.

Dada la relevancia medioambiental del Archipiélago de Galápagos, el MEER se ha establecido como meta satisfacer toda la demanda eléctrica con energías renovables.

Las expectativas de potencia instalada en generación eólica para el 2015 que perfila el MEER, se encuentran entre los 40 y 50 MW.

Además, en 2009 se comenzó a trabajar en desarrollar el atlas eólico de Ecuador, con la finalidad de hacerlo accesible y publicarlo en la Web del MEER. A pesar de no disponer de la herramienta de evaluación del recurso eólico, esta previsto el desarrollo de proyectos eólicos en aquellas localizaciones en las cuales hay

referencias históricas de vientos constantes, se han realizado estudios de factibilidad y están a la espera de financiación. (Proyecto TECH4CDM)

Tabla 1. Proyectos previstos de generación eólica en el Ecuador. (Fuente: MEER)

OPORTUNIDADES EÓLICAS EN ECUADOR		
LUGAR	POTENCIA	ESTADO
San Cristóbal	2.4 MW	En operación
Baltra	2.25 MW	En proyecto
Salinas	15 MW	En proyecto
Huascachaca	30 MW	En proyecto
Villonaco	15 MW	En ejecución
Las Chinchas	10 MW	En proyecto
Membrillo	45 MW	En proyecto
Electrificación rural (pequeña escala)		

1.2. POTENCIALIDADES DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES

“La información sobre los potenciales de energía renovable debe ser cuidadosamente analizada. Muchos autores argumentan varios tipos de potenciales, y no existe una sola definición los varios tipos de potenciales de energía renovable. Se plantean los siguientes cinco tipos de potenciales.” (REN 21, 2008)

Potencial Teórico: El potencial teórico se deriva de los parámetros naturales y climáticos (Ejemplo: la irradiación solar total en la superficie de un continente). El potencial teórico se puede cuantificar con una exactitud razonable, pero la información es de poca relevancia.

El potencial teórico de las fuentes de energía renovables es enorme en comparación con la demanda mundial de energía, y hay varias restricciones en la explotación del potencial teórico.

Potencial técnico: El potencial técnico tiene en cuenta las restricciones geográficas (Ejemplo: La cubierta de uso del suelo que reduce el potencial teórico), así como las limitaciones estructurales y técnicas. Debido al progreso técnico de las tecnologías de conversión de la energía potencial, el potencial técnico puede cambiar con el tiempo.

Potencial económico: El potencial económico es el potencial técnico que puede ser explotado a un costo competitivo. A medida que el punto de equilibrio entre las tecnologías de energía renovable y el cambio de tecnologías convencionales en el tiempo (aumento de los precios de los combustibles fósiles, la reducción de costos de la energía renovable en la generación), el potencial económico depende en gran medida en la formulación de condiciones socio económicas mundiales.

El potencial de implantación: Se caracteriza por la adopción en el mercado potencial de las tecnologías de energía renovable con arreglo a las condiciones existentes en cada país. Depende por ejemplo, la estructura del sistema de abastecimiento existente, la evolución de la demanda energética, los objetivos de política energética y los instrumentos en su lugar.

El potencial de la demanda: Con el aumento de la competitividad de las energías renovables, en el futuro el potencial económico podrá ser superior a la demanda de energía. En tal caso, el potencial de implantación de los recursos renovables es, lógicamente, limitada por la demanda de energía.

2. ESTACIONES METEOROLÓGICAS

Una **estación meteorológica** es una instalación destinada a medir y registrar regularmente diversas variables meteorológicas. Estos datos se utilizan tanto para la elaboración de predicciones meteorológicas a partir de modelos numéricos como para estudios climáticos. (BLUESTEIN, 1992)

2.1. ESTACIONES DEL INAMHI

Con la finalidad de disponer de datos adecuados para el conocimiento del tiempo atmosférico y la situación climática, se requiere administrar una red de estaciones meteorológicas, que sea suficientemente representativa del país y, cuya distribución satisfaga la demanda de los usuarios internos y externos al INAMHI.

“La instalación de las estaciones, la recolección de los datos meteorológicos, la comunicación de los mismos, la digitación, procesamiento, validación y exposición al servicio del usuario, requiere de parte del estado una significativa inversión y, de los técnicos del INAMHI el conocimiento solvente que satisfagan los requerimientos técnicos, con el cumplimiento de normas internacionales.” (INAMHI, 2006)

Por otra parte se hace necesario la supervisión, el control y la capacitación continua a quienes hacen las labores de observación, digitación y comunicación de datos.

Las estaciones meteorológicas se clasifican en varios tipos según los objetivos y los parámetros que se desee medir, entre las principales podemos citar las siguientes:

- Climatológicas
- Agrometeorológicas
- Sinópticas (de superficie y en altitud)
- Aeronáuticas
- Especiales

2.2. METODOLOGÍA USADA POR EL INAMHI

“En las estaciones agrometeorológicas o de referencia, se realizan observaciones horarias entre las 07 y 19 horas. En las climatológicas principales, las observaciones son bihorarias y, en las ordinarias se registran tres observaciones diarias (07, 13 y 19 horas). En las estaciones pluviométricas pueden realizarse tres tipos de registros: tres observaciones diarias (07, 13 y 19 horas), dos observaciones (07 y 19 horas) o una observación (07 horas).” (INAMHI, 2006)

Los dos puntos anteriores se refieren exclusivamente a la toma de los datos a través de mediciones, observaciones o registros realizados por el Observador u Operador de la estación a las horas señaladas, en formularios diseñados para el efecto.

Adicionalmente a la toma de datos por el Observador, también existen los registros gráficos, los cuales registran la evolución de un fenómeno meteorológico en el tiempo, de una manera continua. Estos son de diversa índole, pudiendo ser diarios, semanales, mensuales o para un período específico, dependiendo del instrumento registrador.

En el año 2009, el ex PREDESUR instaló 10 estaciones meteorológicas automáticas, modernas y digitales en la provincia de Loja. Con la desaparición de PREDESUR, éstas estaciones pasaron a propiedad del INAMHI. Se prevé que éstas brinden información detallada del comportamiento de las variables climáticas en la provincia de Loja, con mayor resolución y nivel de confiabilidad que las estaciones convencionales.

2.3. INSTRUMENTACIÓN:

La instalación de las estaciones, así como la ubicación del instrumental para la toma y/o registro de los datos meteorológicos, han sido realizadas de acuerdo a normas internacionales establecidas por la Organización Meteorológica Mundial (OMM).

A continuación, se citan algunas definiciones relacionadas con las estaciones, elementos meteorológicos, instrumentos y las características de su instalación.

VIENTO.

Movimiento del aire con respecto a la superficie de la tierra. Las direcciones se toman de donde viene o procede el viento, las velocidades en metros por segundo.

DISPOSITIVOS PARA MEDIR EL VIENTO

a) Anemocinemógrafo

Aparato registrador en un gráfico de la variación cronológica de la dirección, fuerza y recorrido del aire.

b) Veleta aspa de Wild

Instrumento de observación directa del viento, en el cual el viento actúa sobre una placa liviana suspendida sobre el eje horizontal, cuya inclinación con la vertical esta en función de la velocidad del viento y que por medio de una veleta posiciona el aparato con referencia de donde sopla el viento marcando su dirección.

c) Anemómetro totalizador

Anemómetro de cazoletas o molinete donde la rotación se transmite a un contador mecánico indicando directamente el movimiento del aire que pasa por el anemómetro, o sea mide el recorrido del aire del cual se calcula la velocidad media del aire en Km/h. Todos estos aparatos se encuentran instalados a diez metros de altura

3. MODELIZACIÓN EÓLICA

La evaluación del potencial eólico consiste en la obtención de la posible producción del conjunto de aerogeneradores que componen un parque eólico.

Para ello, es imprescindible determinar el comportamiento del viento al nivel de cada componente de dicho parque eólico. Por una parte, el conocimiento del comportamiento del viento (velocidad media anual, distribución de Weibull, distribución direccional, variabilidad, etc.), en la ubicación de un aerogenerador, permite la evaluación de la producción media esperada y, en consecuencia, la viabilidad energética del proyecto. Por otra parte, es necesario para la determinación de las condiciones normales y extremas que definen la clase del emplazamiento elegido y, por tanto, el tipo de aerogenerador a instalar en el mismo.

“El uso directo de los datos de velocidad del viento medidos para los cálculos de recursos eólicos, es válido solamente para el lugar exacto de medida. La única información facilitada por las mediciones realizadas por la estación meteorológica no permite tener en cuenta la influencia de la orografía y de la rugosidad del terreno y, sobretodo, no es suficiente para la evaluación del recurso en la totalidad del emplazamiento del parque eólico. Por tanto, es indispensable disponer de algún sistema de “conversión” de esos datos de viento medidos, antes de poder utilizarlos para el cálculo del potencial eólico de toda una región.

Para ello, se han desarrollado varios modelos de cálculo de mecánica de fluidos de tal forma que permitan proporcionar más información sobre la evolución espacial del viento en el emplazamiento objeto de estudio, a través de la “extrapolación vertical y horizontal” de los datos de viento medidos por la torre meteorológica.

Varios modelos llamados de meso – escala (MESOSCALE), como por ejemplo los modelos MM5 o MASS, se utilizan para la predicción meteorológica de media o gran escala. En el campo de la energía eólica, permiten conocer con cierta fiabilidad los fluidos de viento a escala del globo terrestre o de zonas muy amplias.

En los años 80, el laboratorio Riso National Laboratory de Dinamarca, pionero en los estudios de energía eólica, desarrolló el modelo WAsP (Wind Atlas Analysis and Application Program), utilizado para la concepción del Atlas Eólico Europeo. En la actualidad, WAsP es el programa de modelado del comportamiento del viento más utilizado para la estimación del recurso eólico.

Sin embargo, varios estudios o publicaciones demostraron que, para estudios en terrenos complejos, es decir, con fuertes cambios de orografía y/o rugosidad, WAsP está muy limitado al ser un modelo de mecánica de fluidos simplificado. Estas conclusiones justificaron el desarrollo de modelos de Dinámica de Fluidos Numérica (Computational Fluid Dynamics, CFD) más complejos, con tiempos de cálculo mucho más importantes pero supuestamente capaces de describir con una mayor precisión la evaluación tridimensional del flujo de viento. Los dos principales programas CFD especializado en energía eólica son Windsim, desarrollado por la empresa noruega Vector y, Metedyn, desarrollado por la empresa francesa homónima. (TALAYERO, MARTINEZ, 2008)

3.1. WAsP

WAsP (del inglés Wind Atlas Analysis and Application Program) es una herramienta de software que permite evaluar el recurso eólico en un determinado emplazamiento a partir de medidas de viento de estaciones meteorológicas cercanas. Con los resultados de la simulación, el programa puede generar mapas de viento de la zona de estudio. Además, incluye un sofisticado modelo teórico para simular el efecto del rozamiento con el suelo a través del coeficiente de rugosidad y también la influencia de los obstáculos en el viento disponible en las máquinas.

En un principio fue desarrollado como parte del proyecto de Atlas Eólico Europeo y posteriormente adaptado a la evaluación de producción de parques eólicos.

Los modelos se basan en los principios físicos del movimiento de un fluido en la capa límite de la atmósfera y tienen en consideración distintos fenómenos posibles, como

son el cambio de las condiciones en la superficie, los efectos de “rebufo” debido a edificios u otros tipos de obstáculos y las modificaciones que se producen en el fluido eólico al variar la topografía de la superficie.

WAsP corrige los datos de viento, medidos a través de su ajuste de Weibull, principalmente en función de los tres “modelos de corrección de datos”:

- El modelo de cambio de rugosidad
- El modelo de “rebufo” (influencia de los obstáculos)
- El modelo orográfico.

De esta forma, WAsP puede construir mapas de recurso, y representar velocidad media, densidad de potencia, parámetros de Weibull para toda la zona de interés. Estos mapas son muy útiles a la hora de optimizar un parque eólico, al permitir identificar las zonas con mayor potencial eólico. (TALAYERO, MARTINEZ, 2008)

3.2. MODELOS CFD

WINDSIM

Windsim es un programa de evaluación de recurso eólico, basado en un solver CFD de las ecuaciones tridimensionales de Reynolds Averaged Navier – Stokes, desarrollado por la empresa noruega Vector, y ha sido utilizado en el diseño del Atlas Eólico de Noruega.

La resolución de las ecuaciones no-lineales de transporte de masa, momento y energía, hace, teóricamente, de este programa una herramienta más fiable para la modelización de flujo de viento en terreno complejo o en situaciones con climatologías locales complejas.

Windsim, como programa de CFD, resuelve las ecuaciones fundamentales de conservación de materia, energía y cantidad de movimiento en un dominio (geometría) concreto, discretizado, es decir, convertido en una malla de puntos (volúmenes o elementos finitos). (TALAYERO, MARTINEZ, 2008)

f. METODOLOGÍA

MÉTODOS:

Los métodos a utilizar en el presente proyecto de investigación son los siguientes:

El método **científico teórico**, para conocer los hechos observables y reales sobre la información y los datos que servirán como base del modelo.

El **modelo sistemático** para elaborar un modelo del potencial eólico – solar en la Provincia de Loja.

Muy importante en este proyecto es la utilización del método **de la mediación**, para obtener los datos de estaciones meteorológicas, y del **modelo experimental** para establecer las relaciones de las variables que se van a medir en todo el proceso del proyecto.

Teniendo los datos suficientes se necesitará utilizar el **método estadístico – matemático**, para realizar la interpolación de la información en zonas donde no se encuentren datos suficientes observables o medibles.

Y por último, el **método hipotético – deductivo** para la verificación de la hipótesis.

PROCEDIMIENTO:

1. Obtener información histórica y actual sobre datos de estaciones meteorológicas ubicadas en la provincia de Loja.
2. Validar la información obtenida, ya sean datos, fórmulas, métodos de interpolación, con la finalidad de establecer la confiabilidad de los datos.
3. Establecer que tipo de modelo y software es el más adecuado para la información obtenida.
4. Generar mapas de rugosidad y altitud de toda la Provincia de Loja.

5. Elaborar un modelo con software computacional para la interpolación de resultados, así como la interpretación gráfica, modelación matemática, cuadros estadísticos y presentación de resultados, de tal forma que se pueda obtener datos de velocidad y dirección del viento en toda la Provincia de Loja con un margen de error no mayor al 15%.
6. Utilizar un SIG para generar un mapa de caracterización del recurso eólico en la provincia de Loja.
7. Verificar si la hipótesis se cumple, con la medición y comprobación de los resultados obtenidos.
8. Presentar y publicar los resultados.

g. CRONOGRAMA

CRONOGRAMA MENSUAL DE EJECUCIÓN POR OBJETIVOS						
OBJETIVOS / ACTIVIDADES	2012		2013			
	Nov	Dic	Ener	Feb	Marzo	Abril
Aprobación del Proyecto	X					
Objetivo 1. 1. Obtener datos de velocidad y dirección del viento de estaciones meteorológicas instaladas en la Provincia de Loja.investigadores.						
Actividad 1.1. Obtener información histórica y actual sobre datos de estaciones meteorológicas ubicadas en la provincia de Loja.	X	X				
Actividad 1.2. Validar la información obtenida, ya sean datos, fórmulas, métodos de interpolación, con la finalidad de establecer la confiabilidad de los datos.		X				
Objetivo 2. Elaborar un modelo utilizando un software computacional que permita la interpolación de los datos obtenidos para toda la Provincia de Loja.						
Actividad 2.1. Establecer que tipo de modelo y software es el más adecuado para la información obtenida.			X			
Actividad 2.2. Generar mapas de rugosidad y altitud de toda la Provincia de Loja.			X	X		
Actividad 2.3. Elaborar un modelo con software computacional para la interpolación de resultados, así como la interpretación gráfica, modelación matemática, cuadros estadísticos y presentación de resultados, de tal forma que se pueda obtener datos de velocidad y dirección del viento en toda la Provincia de Loja con un margen de error no mayor al 15%.				X	X	
Objetivo 3. Elaborar una metodología que permita el ulterior uso del modelo matemático en otras zonas de la Región Sur del Ecuador.						
Actividad 3.1. Utilizar un SIG para generar un mapa de caracterización del recurso eólico en la provincia de Loja.					X	
Actividad 3.2. Verificar si la hipótesis se cumple, con la medición y comprobación de los resultados obtenidos.					X	
Actividad 3.3. Presentar y Publicar los resultados.						X
Presentación y Disertación de Tesis						X

h. PRESUPUESTO Y FINANCIAMIENTO

RECURSOS HUMANOS

Recursos Humanos	Cantidad	Horas	Costo Hora	Costo Total	Financiamiento
Asesor:					
Dr. Carlos Pueyo	1	100	0	0	Universidad de Zaragoza
Ing. Jorge Maldonado	1	100	4.5	450	UNL
Responsable					
Ing. Juan Carlos Solano	1	240	4.5	1080	Personal
TOTAL				1530	

RECURSOS MATERIALES

Recursos Materiales	Cantidad	Costo Unitario	Costo Total	Financiamiento
Acceso a Internet (mes)	5	20	100	UNL
Impresora	1	120	120	Personal
Equipo de oficina	1	500	500	UNL
Computadora personal	1	1000	1000	Personal
Servidor de almacenamiento de datos	1	1000	1000	UNL
TOTAL			2720	

RECURSOS TÉCNICOS - TECNOLÓGICOS

Cantidad	Descripción	Costo Unitario	Costo Total	Financiamiento
1	Asesoría técnica y venta de servicios para la utilización de los laboratorios, equipos y software del CIRCE para correr los modelos del mapa eólico de la Provincia de Loja.	4538	3750	AYUDA ECONÓMICA SENESCYT
1	Sistema de Información Geográfico	784	784	UNL
TOTAL			4534	

RECURSOS VARIOS

Recursos Varios	Cantidad	Costo Unitario	Costo Total	Financiamiento
Visita a INAMHI	1	100	200	Personal
Congresos, Seminarios	3	200	600	Personal
TOTAL			800	

PRESUPUESTO POR FINANCIAMIENTO

UNL	2834
AYUDA ECONÓMICA SENESCYT	3750
PERSONAL	3000
TOTAL	9584

PRESUPUESTO POR RUBROS

Recursos Humanos	1530
Recursos Materiales	2720
Recursos Técnicos Tecnológicos	4534
Recursos Varios	800
TOTAL	9584

i. BIBLIOGRAFÍA

ENERGÍA eólica /Ana Patricia Talayero Navales y Enrique Telmo Martínez (coordinadores); Ángel Antonio Bayod . Zaragoza: Prensas Universitarias de Zaragoza, 2008. 302 p. ISBN 978-84-92521-21-0

GARCIA Sancho José ; HERRERO Miro, Rafael; GALLARDO BERMELL,

Sergio; Año: 2006, GESTION DE LA ENERGIA, España, Editorial: UNIVERSIDAD POLITECNICA DE VALENCIA (UPV), 243p.

WORLD ENERGIA COUNCIL 2007. Survey of Energy Resources, Londres ISBN: 094612126 5. Copyright © 2007 World Energy Council. 600 pp.

GLOBAL WIND POWER BOOM CONTINUES DESPITE ECONOMIC WOES. Global Wind Energy Council , Febrero 15 del 2007.

[[http://www.gwec.net/index.php?id=30&tx_ttnews\[tt_news\]=247](http://www.gwec.net/index.php?id=30&tx_ttnews[tt_news]=247)]

REN21, Wolfram KREWITT, Sonja SIMON, Thomas PREGGER with contributions from Paul SUDING. Renewable energy deployment potentials in large economies. Stuttgart, April 2008

HOOGWIJK, M., Graus, W. (2008): Global potential of renewable energy sources: a literature assessment. Background report prepared by order of REN21. Ecofys, PECSNL072975, 2008.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA E HIDROLOGIA –INAMHI, 2006. Anuario Meteorológico 2006, 200 p, ISSN N° 13903586

METEOTES. 2010 Base de Datos Meteorológicos Global Meteonorm Version 6.0, Suiza, 32p.

FAO WATER 2010. Natural Resources and environment Departament,

[http://www.fao.org/nr/water/infores_databases_climwat.html]

RÍOS, Sixto (1995). Modelización. Alianza Universidad. ISBN 978-84-206-2822-6, 1ra Edicion, España, 21p

ANEXOS

MATRIZ RESUMEN DEL PROCESO DE DISEÑO DEL PROYECTO DE TESIS

PROBLEMA GENERAL DE INVESTIGACIÓN (ENUNCIADO):

¿Es posible elaborar un modelo computacional utilizando datos de estaciones meteorológicas, que permita conocer el potencial uso del recurso eólico en la Provincia de Loja?

TEMA	OBJETO DE INVESTIGACIÓN	OBJETIVO DE INVESTIGACIÓN	HIPÓTESIS DE INVESTIGACIÓN
Caracterización del Recurso Eólico en la Provincia de Loja, utilizando modelos computacionales	Energía Eólica en la Provincia de Loja	Elaborar un modelo en un software computacional que permita obtener información confiable sobre la energía eólica en la Provincia de Loja, en base a los datos obtenidos de estaciones meteorológicas.	El modelo permitirá obtener datos de velocidad y dirección del viento en la Provincia de Loja, con una confiabilidad mayor al 85%.