



Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo
Facultad de Ingeniería Mecánica
Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecánica

Tesis:

**Generación de un modelo de Mesoescala
para pronosticar la velocidad del viento en
Tepuxtepec, Michoacán**

Para obtener el grado de:

Maestra en Ciencias en Ingeniería Mecánica

Presenta:

Maritza Talhia Bernabé Morales

Asesor:

Erasmus Cadenas Calderón

Doctor en Ingeniería

Co-asesor:

Christian Morales Ontiveros

Maestro en Ciencias

Morelia, Michoacán, noviembre de 2021

Agradecimientos

Al Dr. Erasmo, por su paciencia, tiempo y ejemplo de amor a la ciencia y a la investigación.

Al Mtro. Christian, por su orientación y apoyo a lo largo de estos años.

A mi mamá y a mi hermana por todo su cariño.

A mi papá, quién ya no pudo estar presente.

A mis profesorxs a quienes respeto y admiro.

A mis compañerxs del Posgrado.

A mis amigas.

Índice general

Resumen	1
Abstract	2
Introducción	3
Justificación	6
Objetivo General	9
Objetivos Específicos	9
Hipótesis	10
Planteamiento del problema	11
1. Marco Teórico	13
1.1. Las capas de la atmósfera	13
1.2. La naturaleza variable del viento	16
1.3. Escalas espaciales de los procesos atmosféricos	19
1.4. Tipos de pronóstico	20
1.5. Modelos de Mesoescala	21
1.6. Situación de la energía eólica en Mexico y en el mundo	24
1.7. Funcionamiento de los parques eólicos	27
2. Modelos NWP (Numerical Weather Prediction) y la herramienta WRF (Weather Research Forecast)	30
2.1. Antecedentes	30
2.2. Modelos NWP (Numerical Weather Prediction)	34
2.3. Ecuaciones Primitivas	36
2.4. Descripción de la herramienta WRF (Weather Research Forecast)	37
3. Desarrollo del modelo de pronóstico para Tepuxtepec, Michoacán, con la herramienta WRF	48
3.1. Elección del sitio Tepuxtepec, Michoacán	48
3.1.1. Mapas anuales de la velocidad del viento del Estado de Michoacán	50

3.2. Desarrollo del modelo de pronóstico con WRF	52
3.2.1. Maquina Virtual	52
3.2.2. Datos de Reanálisis	53
3.2.3. Sistema de Pre-procesamiento o WPS (WRF Preprocessing System)	56
3.2.4. Integrador Numérico WRF-ARW (Advanced Research WRF)	62
3.3. Post-procesamiento	70
4. Validación del Modelo de Pronóstico de Mesoescala para Tepuxtepec, Michoacán	79
4.1. Primer grupo de datos (1 al 5 de Febrero de 2017)	82
4.2. Segundo grupo de datos (1 al 5 Abril 2021)	85
4.3. Tercer grupo de datos (1 al 10 de Noviembre de 2020)	89
Conclusiones	92

Índice de figuras

1.1. Capas de la atmósfera. Tomado de “Estructura de la Atmosfera” por atlas-geomundo.blogspot.com, 2017.	14
1.2. Vientos Globales. Tomado de “Energía eólica” por Talayero Navales, A.P. y Telmo Martínez, E., 2011. Prensas de la Universidad de Zaragoza. España.	17
1.3. Espectro de Van der Hoven. Tomado de “Energía eólica” por Talayero Navales, A.P. y Telmo Martínez, E., 2011. Prensas de la Universidad de Zaragoza. España.	18
1.4. Total de instalaciones eólicas. Tomado de “Global Wind Report 2019” por Lee, J. y Zhao, F., 2020. Global Wind Energy Council. Brussels, Belgium.	25
1.5. Nuevas instalaciones eólicas. Tomado de “Global Wind Report 2019” por Lee, J. y Zhao, F., 2020. Global Wind Energy Council. Brussels, Belgium.	26
1.6. Funcionamiento parque eólico. Tomado de “Sabes cómo funcionan los parques eólicos terrestres?” por Iberdrola, 2021.	29
2.1. Izquierda: Cleveland Abbe (1838-1916). Centro: Vilhelm Bjerknes (1862-1951). Derecha: Lewis Fry Richardson (1881-1953). Tomado de ”The origins of computer weather prediction and climate modeling” por Lynch, P., 2007, <i>Journal of Computational Physics</i> , 227(2008), 3431-3444.	31
2.2. Computadora ENIAC (Electronic Numerical Integrator and Computer). Tomado de ”The origins of computer weather prediction and climate modeling” por Lynch, P., 2007, <i>Journal of Computational Physics</i> , 227(2008), 3431-3444.	33
2.3. Cubos 3D de la atmosfera usados por los modelos NWP. Tomado de “Review of the use of Numerical Weather Prediction (NWP) Models for wind energy assessment” por Al-Yahyai, S., Charabi, Y., Gastli, A., 2010, <i>Renewable and Sustainable Energy Reviews</i> , 14(2010), 3192-3198.	35
2.4. Diferentes modelos NWP. Tomado de “Review of the use of Numerical Weather Prediction (NWP) Models for wind energy assessment” por Al-Yahyai, S., Charabi, Y., Gastli, A., 2010, <i>Renewable and Sustainable Energy Reviews</i> , 14(2010), 3192-3198.	36

2.5. Esquema del funcionamiento de WRF. Adaptado de “A Description of the Advanced Research WRF Version 3” por Skamarock, W., Klemp, J., Dudhia, J., Gill, D., Barker, D., Duda, M., Huang, X., Wang, W., y Powers, J., 2008. National Center for Atmospheric Research.	40
2.6. Tipos de proyecciones: Lambert (arriba izquierda), Mercator (arriba derecha), Estereográfica Polar (abajo izquierda) y Cilíndrica Equidistante (abajo derecha). Tomado de “The WRF Pre-Processing System (WPS): Fundamental Capabilities” por Duda, M., 2021. WRF User’s Tutorial January 2021. UCAR.	42
2.7. Opciones dinámicas y físicas de WRF-ARW contenidas en la namelist.wps. Adaptado de “A Description of the Advanced Research WRF Version 3” por Skamarock et al., 2008. National Center for Atmospheric Research.	45
3.1. Zonas con alto potencial de energía eólica. Tomado del “Atlas Nacional de Zonas con Alto Potencial de Energías Limpias”, 2018. Secretaria de Energía del Gobierno de México.	49
3.2. Zonas con alto potencial de energía eólica en la región de Michoacán. Tomado del “Atlas Nacional de Zonas con Alto Potencial de Energías Limpias”, 2018. Secretaria de Energía del Gobierno de México.	49
3.3. Mapas de la velocidad promedio anual del viento para la región de Michoacán 2017 (arriba izquierda), 2018 (arriba derecha), 2019 (abajo izquierda) y 2020 (abajo derecha)	51
3.4. Captura de pantalla de la Maquina Virtual que contiene a WRF	53
3.5. Base de datos de reanálisis <i>NCEP Climate Forecast System Version 2 (CFSv2)</i> utilizada para desarrollar el modelo de pronóstico.	54
3.6. Tráferencia de los datos de re-análisis desde la computadora a la maquina virtual con el software <i>WinSCP</i>	56
3.7. Uso de la maquina virtual con la ayuda de PuTTY.	57
3.8. Captura de pantalla del software GrADS	71
3.9. Mapa de la componente <i>u</i> del viento a 10 m para la fecha 1 de febrero de 2017 a las 00hrs	76
3.10. Mapa de vectores de la velocidad del viento a 10 m para la fecha 1 de febrero de 2017 a las 00hrs	76
3.11. Gráfica de la velocidad del viento a 10m de altura para Temascales perteneciente a la fecha del 1 al 5 de febrero de 2017.	77
4.1. Grados del desempeño estadístico del modelo de pronóstico del viento. Adaptado de “WRF-Model Performance for Wind Power Forecasting in the Coast Ranges of Central California” por Clifford, K. T., 2011. San Jose State University. California, USA.	82
4.2. Ubicación de la estación meteorológica Temascales y los 4 puntos de la malla más cercanos	83
4.3. Estación Temascales: Datos reales observados vs Datos modelo del pronóstico.	84

ÍNDICE DE FIGURAS

4.4. Ubicación de las Estaciones Meteorológicas Automatizadas (EMAs) de Huimilpan, Mariposa Monarca, Atlacomulco y la estación Temascales. . .	86
4.5. Velocidad del viento pronosticadas por el modelo WRF Vs. Datos observados de las Estaciones Meteorológicas Huimilpan, Mariposa Monarca y Atlacomulco.	87
4.6. Velocidad del viento pronosticadas por el modelo WRF Vs. Datos observados de las Estaciones Meteorológicas Huimilpan, Mariposa Monarca y Atlacomulco [Versión ampliada]	88
4.7. Estación Temascales: Velocidades del viento reales observadas vs Velocidades del viento pronosticadas por el modelo WRF	90
4.8. Estación Temascales: Velocidades del viento reales observadas vs Velocidades del viento pronosticadas por el modelo WRF [Versión ampliada] . .	91

Resumen

El objetivo de este trabajo de investigación es mostrar un modelo numérico de predicción climática de mesoescala desarrollado con la herramienta llamada Weather Research Forecast (WRF) para la predicción de la velocidad del viento en la región de Tepuxtepec, Michoacán, México. Esta zona, de acuerdo a la evaluación del recurso eólico, muestra ser la más propicia en el Estado de Michoacán para la generación de energía eléctrica. Se trata de un modelo de escala regional con pronóstico a mediano plazo. La validación del modelo de predicción se hizo al comparar las velocidades del viento obtenidas por el modelo contra mediciones observadas de la estación meteorológica Temascalas, Michoacán, logrando resultados satisfactorios.

Palabras clave: Energía eólica, pronóstico, mesoescala, modelo, WRF.

Abstract

The objective of this research work is to show a numerical mesoscale climate prediction model, developed with the tool called Weather Research Forecast (WRF), to forecasting the wind speed in the region around Tepuxtepec, Michoacan, Mexico. This area, according to the wind resource evaluation, shows to be the most auspicious in the State of Michoacan for electricity generation. This is a regional-scale model with a medium-term forecast. The validation of the forecasting model was made comparing wind speed data from the forecasting model against observed data from the meteorological station Temascales, Michoacán; getting positive results.

Keywords: Wind energy, forecast, mesoscale, model, WRF.

Introducción

La crisis climática que se vive actualmente ha puesto en evidencia la necesidad de generar energía de manera sustentable, obligando a los países a replantearse sus métodos de generación de energía. Cada año las energías limpias van ganando terreno en el mercado energético, especialmente la energía eólica. En ese contexto México no es la excepción, de acuerdo al Annual Wind Report de 2019, México presentó el mayor crecimiento en instalaciones eólicas en tierra en América Latina (Lee y Zhao, 2020), también de acuerdo al mismo reporte de 2021, México se encuentra en el cuarto lugar en instalaciones eólicas en América, sólo detrás de EUA, Canadá y Brasil (Lee y Zhao, 2021). Además, es importante señalar que en 2019 México ratificó el Acuerdo de Paris con el que se compromete a reducir un 22 % sus emisiones de gases de efecto invernadero para el 2030 así como el 51 % de sus emisiones de carbón negro (Gobierno de México, 2019).

En los últimos años se ha incrementado la importancia de la energía eólica en el mercado de los diferentes tipos de generación de energía. La rentabilidad que representa la hecho sumamente atractiva. Pero a diferencia las fuentes de energía tradicionales cuya producción es fácilmente regulable, la energía eólica presenta varios inconvenientes. La generación de energía eólica está estrechamente relacionada con la velocidad del viento, la cuál es variable en tiempo y en espacio. No existe un método rentable para almacenar

la energía eólica, lo que provoca que ésta deba ser entregada inmediatamente a la red eléctrica, lo anterior provoca que las compañías dedicadas a este rubro tengan la obligación legal de reportar su producción, para que ésta sea incorporada a la planeación eléctrica del Sistema Nacional. (Bramer, 2013)

Además las implicaciones financieras de un buen pronóstico de la velocidad del viento tienen grandes consecuencias. De acuerdo a Schreck (2008) errores en la exactitud del pronóstico de la velocidad del viento pueden llevar a pérdidas de hasta \$12 millones de dólares a lo largo de su vida para emplazamientos eólicos del tamaño de 100MW. Por lo tanto un pronóstico acertado y preciso de la velocidad del viento se vuelve sumamente importante conforme se introduce más energía eólica en el mercado de las energías. (Bramer, 2013)

El objetivo de este trabajo es desarrollar un modelo de pronóstico de mesoescala con ayuda de la herramienta Weather Research Forecast (WRF) para la predicción de la velocidad del viento en la región de Tepuxtepec, Michoacán, México. Se trata de un modelo de escala regional o mesoescala, cuyo pronóstico es a mediano plazo, es decir, de un rango de 5 días a 10 días. La validación del modelo se hizo al comparar las velocidades del viento obtenidas por el modelo de pronóstico contra mediciones observadas obtenidas principalmente de la estación meteorológica de Temascales, Michoacán; obteniendo resultados sumamente satisfactorios.

El *Capítulo 1* consiste del marco teórico lo que incluye una descripción de la atmósfera, la naturaleza variable del viento, los tipos de pronóstico que existen y su clasificación de

acuerdo a su escala temporal o espacial, además de ejemplos de modelos de mesoescala, así como la situación actual de la energía eólica y el funcionamiento de los parques eólicos.

En el *Capítulo 2* se hace una descripción de los modelos NWP, lo que incluye un recorrido histórico sobre el desarrollo de los modelos numéricos de predicción climática. También incluye una descripción de la herramienta Weather Research Forecast (WRF) utilizado para el desarrollo del presente modelo de predicción.

En el *Capítulo 3* se explica la creación y desarrollo de modelo WRF específico para la zona de Tepuxtepec, Michoacán.

Finalmente, en el *Capítulo 4* se encuentra la validación del modelo de predicción creado haciendo una comparación con datos observados obtenidos del Sistema Meteorológico Nacional (SMN).

Justificación

La crisis climática que se vive actualmente así como sus consecuencias ha puesto en evidencia la necesidad de generar energía de manera sustentable apostando por fuentes de energía limpias tales como la energía eólica. Ejemplo de estos esfuerzos es el acuerdo de París, firmado por un número importante de países incluido México, y ratificado en 2019 con el cambio de gobierno, en el cuál el país se compromete a reducir un 22 % sus emisiones de gases de efecto invernadero para el 2030, así como el 51 % de sus emisiones de carbón negro.

En los últimos años, la realidad del cambio climático ha obligado a los países a replantear sus formas de generación de energía, ello ha influido en una mayor inversión, ya sea de capital público o privado, en energías limpias. Pero a diferencia de las fuentes de energía tradicionales donde su producción es fácilmente regulable, las energías limpias por su naturaleza, especialmente la energía eólica, son difíciles de predecir, por lo cuál es necesario de herramientas adicionales que permitan calcular su potencial energético. En ese contexto, el presente trabajo adquiere importancia ya que la finalidad de este modelo de pronóstico de la velocidad del viento es que sea utilizado como una herramienta que permita predecir o pronosticar la energía que puede ser inyectada a la red eléctrica, en este caso de una zona específica que es la región de Tepuxtepec, Michoacán.

Debido a que las compañías de energía eólica tienen la obligación legal de reportar su producción para que ésta sea incorporada a la planeación eléctrica del Sistema Nacional y así asegurar la cobertura de energía eléctrica, para ello es necesario conocer el comportamiento del viento, es en este momento dónde cobran relevancia los modelos numéricos de pronóstico de la velocidad del viento, como el que se muestra en el presente trabajo de investigación, herramienta indispensables si realmente se quiere un futuro viable para la energía eólica. (Schreck, 2008)

La razón por la que se ha elegido la región de Tepuxtepec, Michoacán viene de dos fuentes principales, la primera de ellas se trata de la tesis de licenciatura publicada en 2014 por Gilberto Suárez Camargo titulada *Evaluación del recurso eólico en el Estado de Michoacán: identificación preliminar*, donde como su nombre lo indica, se evalúan el recurso eólico de diferentes regiones del Estado de Michoacán para identificar aquellas con mayor potencial para la generación de energía eólica de manera comercial, dando diferentes opciones posibles entre las cuales se encuentra la región de Tepuxtepec, Michoacán. (Suárez, 2014)

La segunda fuente es la tesis de maestría publicada en 2018 por Julio Cesar Castañeda Ramírez titulada *Emplazamiento Eólico incorporado a la Red Eléctrica en el Estado de Michoacán*, trabajo donde se concluye que la zona de Tepuxtepec es la región en Michoacán con mayor potencial de aprovechamiento del recurso eólico para la generación de energía eléctrica siendo suficiente para el desarrollo comercial, además, se hace una propuesta de un emplazamiento eólico para esta región. En dicho trabajo se utilizan herramientas como el software WindPRO para la generación de la propuesta, incluyendo

un análisis técnico, estadístico y comercial. (Castañeda, 2018)

Además de éstas dos fuentes, para comprobar si la zona mencionada es la que cuenta con mayor recurso eólico en el Estado de Michoacán, se elaboraron cuatro mapas anuales de velocidades del viento del Estado de Michoacán. Estos mapas se elaboraron haciendo uso de los datos que proporciona la plataforma *GIOVANNI* la cual es administrada por el NASA Goddard Space Flight Center, para la edición de los mapas se utilizó el software para la elaboración de mapas *Qgis*. En estos mapas muestran un promedio anual de la velocidad del viento en la región que incluye al Estado de Michoacán para los años 2017, 2018, 2019 y 2020. De estos mapas podemos observar dos aspectos, el primero de ellos es que los promedios de la velocidad del viento en el Estado de Michoacán se comportan de manera similar en periodos de un año, al menos para los últimos cuatro años; el segundo es que las regiones que presenta mayores velocidades del viento se encuentran al noreste del Estado de Michoacán, zona en la que se encuentra Tepuxtepec y dónde precisamente se propone el emplazamiento eólico. (Bernabé, Cadenas y Morales, 2020)

Cabe mencionar que estos mapas fueron presentados en el *15vo Congreso Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación* que se realizó en la ciudad de Morelia, Michoacán, el pasado 30 de octubre de 2020.

Objetivo General

Generar un modelo de Mesoescala para pronosticar la velocidad del viento en un campo eólico en Tepuxtepec, Michoacán.

Objetivos Específicos

- Revisión bibliográfica.
- Estado actual de la energía eólica.
- Modelos de mesoescala destinados al pronóstico de la velocidad del viento.
- Estudio del sitio seleccionado para realizar el modelo.
- El modelo WRF.
- Modelo WRF para el sitio seleccionado.
- Resultados y discusiones.

Hipótesis

Es posible generar un modelo de Mesoescala para pronosticar la velocidad del viento en un campo eólico ubicado en Tepuxtepec, Michoacán.

Planteamiento del problema

Los efectos y consecuencias del cambio climático, así como la demanda energética mundial están obligando a los países a apostar por energías alternativas sustentables. En ese contexto México no es la excepción, cada año las energías limpias van ganando terreno en la generación de energía eléctrica. De acuerdo al *Annual Wind Report*, México ha tenido un crecimiento considerable en energía eólica. De acuerdo al reporte, en 2018 se contaban con un total de 4935 instalaciones pero para 2019 éstas aumentaron 6215 instalaciones totales, representando el 2% de las nuevas instalaciones mundiales en tierra, siendo el crecimiento más significativo en América Latina. (Lee y Zhao, 2020)

Este crecimiento en la generación de energía eólica a traído a luz varios retos. A diferencia de las fuentes de energía tradicionales cuya producción es fácilmente regulable, la energía eólica está estrechamente relacionada con la velocidad del viento que es variable tanto en el tiempo y como en el espacio. No existe un método rentable para almacenar la energía eólica, por lo tanto ésta deba ser entregada a la red eléctrica inmediatamente. Lo anterior provoca que las compañías dedicadas a este rubro tengan la obligación legal de reportar su producción, para que ésta sea incorporada a la planeación eléctrica del Sistema Nacional. Para poder planear el despacho de energía eólica es necesario conocer el comportamiento de la velocidad del viento, y es en este momento en donde cobran

relevancia los modelos para pronosticar la velocidad del viento. (Bramer, 2013)

Respecto al estado de Michoacán, actualmente en el estado no se cuentan con plantas generadoras de electricidad de manera eólica. Si miramos el **Atlas Nacional de Zonas con Alto Potencial de Energías Limpias (AZEL)** desarrollado por la Secretaría de Energía del Gobierno Federal, podemos observar que el Estado de Michoacán no está incluido dentro de las zonas con potencial de generación eléctrica de energía eólica. (AZEL, 2019)

Sin embargo, dos investigaciones publicadas por la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, más específicamente la tesis de posgrado de Julio Cesar Castañeda titulada *Emplazamiento eólico incorporado a la red eléctrica en el estado de Michoacán*, muestran la factibilidad de un emplazamiento de un parque eólico en la región del lago de Tepuxtepec, Michoacán. Lo cual es confirmado por los mapas de velocidad del viento para el Estado de Michoacán que elaboramos para los últimos cuatro años, generados con datos del servidor NASA Giovanni. (Bernabé, 2020)

Capítulo 1

Marco Teórico

1.1. Las capas de la atmósfera

En términos generales, la atmósfera está dividida en regiones baja y alta. El estudio de la atmósfera baja es conocido como meteorología y el estudio de la parte superior de la atmósfera es conocido como aeronomía. La atmósfera de la Tierra se caracteriza por una variación de la presión y la temperatura de acuerdo a la altura. Precisamente estas variaciones son las que permiten distinguir las diferentes capas de la atmósfera. (Seinfeld y Pandis 2012)

En la figura 1.1 se muestra un gráfico de las diferentes capas de la atmósfera y según Seinfeld y Pandis (2012) podemos clasificarlas de la siguiente manera:

- **Troposfera:** Es la capa más baja de la atmósfera, que se extiende desde la superficie de la Tierra hasta la tropopausa, lo cual es de alrededor de 10 a 15 Km de altitud, dependiendo de la latitud y la época del año. Se caracteriza por un decaimiento de la temperatura conforme se aumenta en la altura.
- **Estratosfera:** Se extiende desde la tropopausa hasta la estratopausa, es decir,

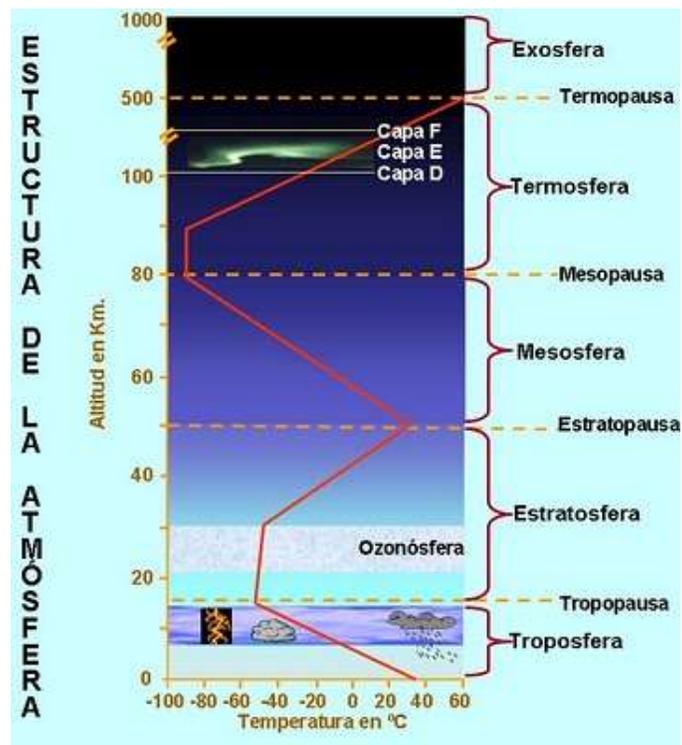


Figura 1.1: Capas de la atmósfera. Tomado de “Estructura de la Atmósfera” por atlas-geomundo.blogspot.com, 2017.

desde los 10 o 15 Km hasta los 45 o 55 Km de altura. Es esta capa la temperatura aumenta conforme a la altura provocando que la turbulencia o *vertical mixing* sea lenta.

- **Mesosfera:** Va desde la estratopausa hasta la mesopausa, es decir, va de los 45 o 55 km de altura hasta los 80 o 90 Km de altura. En esta capa la temperatura disminuye conforme se va aumentando la altura, lo que provoca que contenga el punto más frío en la atmósfera.
- **Termosfera:** Es la región que se encuentra arriba de la mesopausa. Se caracteriza por sus altas temperaturas debido a la absorción de la radiación de onda corta debido al nitrógeno y oxígeno.
- **Exosfera:** Es la región más externa de la atmósfera, a una altitud mayor a los 5000 Km. En esta capa las moléculas de gas con suficiente energía pueden escapar de la gravedad de la Tierra.

Todos los fenómenos meteorológicos y por ende aquellos procesos con los que se relaciona la energía eólica (que es el tema de interés de este trabajo) suceden en la **troposfera**, así que a continuación daremos algunas más de sus características:

En el ecuador la altura promedio de la troposfera es de 18 Km y en los polos es de alrededor de 8 Km. La troposfera contiene casi todo el vapor de agua de la atmósfera. A pesar de que la troposfera sólo representa una fracción de la altura total de la atmósfera, ésta contiene el 80 % del total de la masa de la atmósfera. En esta capa la temperatura decrece casi linealmente con respecto a la altura en una proporción de 9.7 grado Kelvin

por Kilómetro para el aire seco. De acuerdo a la Organización Mundial Meteorológica (WMO) la tropopausa es definida como la capa más baja en la que la razón del decaimiento de la temperatura con respecto a la altura es de 2 grado Kelvin por kilómetro o menos, llegando a una temperatura promedio de 217 grados Kelvin, la tropopausa alcanza su mayor altura en los trópicos disminuyendo hacia los polos. La troposfera también puede dividirse en la *capa límite atmosférica* que va desde la superficie de la tierra hasta una altura de alrededor de 1 Km, y la *troposfera libre* que se extiende desde 1 Km hasta la tropopausa. (Seinfeld y Pandis 2012)

1.2. La naturaleza variable del viento

Lo vientos son movimientos de masa de aire, estos movimientos se crean a escala global debido principalmente a la forma irregular en cómo el sol calienta al planeta, específicamente a la atmósfera. En las regiones ecuatoriales el aire se calienta más que en otras regiones lo que provoca que el aire sea menos denso ahí, es decir, más ligero; por ser más denso ese aire caliente asciende y se dirige hacía los polos donde el aire es más frío cerca de la superficie. En latitudes cerca de los 30°N y 30°S este movimiento se detiene y el aire empieza a enfriarse y concentrarse, entonces en las capas más bajas tiene lugar un flujo de retorno de este aire frío. Las zonas donde el aire desciende son zonas de alta presión y donde el aire asciende son zonas de baja presión. Este gradiente horizontal de presiones mueve el aire desde las altas hacia las bajas presiones lo que determina la velocidad y dirección del viento. Si el gradiente es grande entonces es mayor la velocidad del viento. En la figura 1.2 se muestra un esquema de este proceso. (Talayero y Telmo,

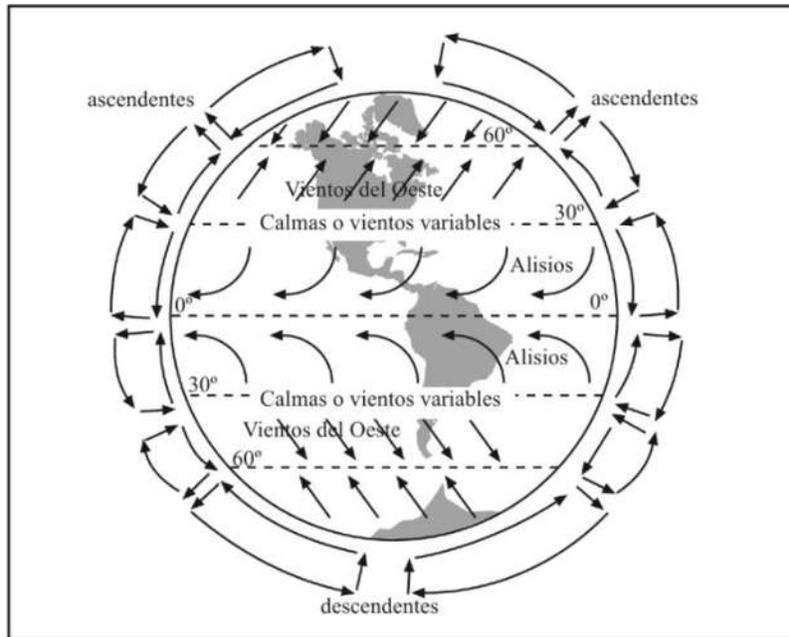


Figura 1.2: Vientos Globales. Tomado de “Energía eólica” por Talayero Navales, A.P. y Telmo Martínez, E., 2011. Prensas de la Universidad de Zaragoza. España.

2011)

Lo movimientos verticales de la atmósfera están limitados por el equilibrio que existe entre la fuerza de gravedad y el gradiente de la presión vertical, lo que se conoce como equilibrio hidrostático:

$$\frac{\partial p}{\partial h} = -g\rho$$

donde $\frac{\partial p}{\partial h}$ es el gradiente de presión vertical, g es la gravedad y ρ es la densidad del aire.

Es importante señalar que la velocidad de los vientos horizontales son mucho mayores que la de los vientos verticales.

Además de la circulación global del viento las características locales de la zona también determinan el comportamiento del viento. Algunos ejemplos de estos efectos locales son las brisas marinas que se deben al calentamiento desigual del mar y la tierra, durante el

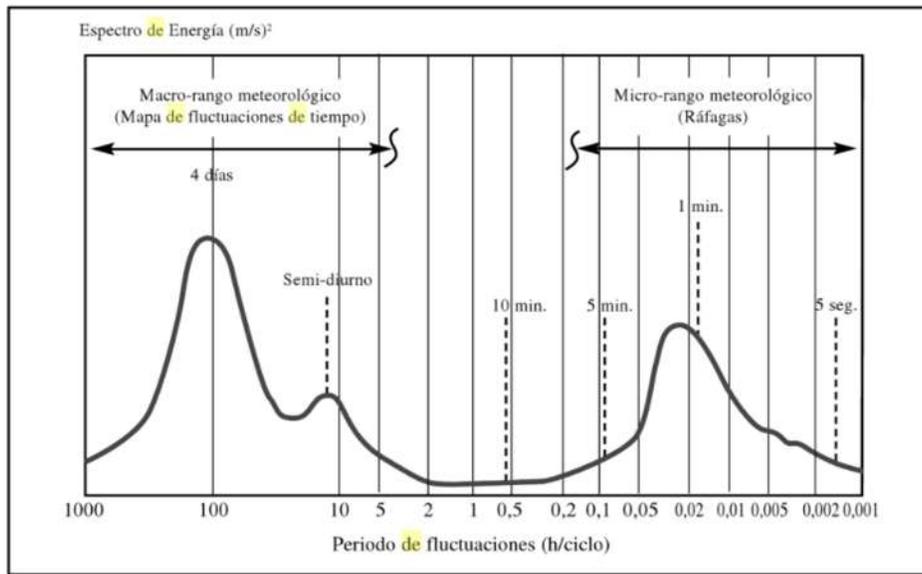


Figura 1.3: Espectro de Van der Hoven. Tomado de “Energía eólica” por Talayero Navales, A.P. y Telmo Martínez, E., 2011. Prensas de la Universidad de Zaragoza. España.

día la tierra se calienta más que el mar por lo tanto el aire viaja del mar hacia la tierra, por la noche sucede lo contrario; también la existencia de montañas y valles, u obstáculos como edificios. Por lo tanto, el movimiento del viento se ve afectado por la situación geográfica, el clima, la topografía y la altura. Los vientos más fuerte y estables ocurren a 10 km sobre la superficie de la Tierra, sin embargo las turbinas eólicas se localizan a alturas mucho menores donde el viento es afectado por la fricción de la superficie de la Tierra y la velocidad es menor. (Talayero y Telmo, 2011)

La velocidad del viento en un mismo punto varia continuamente, estos cambio pueden darse anualmente, estacionalmente, diarios o en segundos. De acuerdo a los estudios sobre el viento se puede deducir una cierta periodicidad, la cual se muestra en el espectro de Van der Hoven (Figura 1.3), esta periodicidad se produce cada cuatro días y cada minuto. Este resultado se utiliza para que, a la hora de tomar mediciones no se escoja ninguno

de estos periodos. Se observa un hueco espectral separando la variación turbulenta de las variaciones más lentas, por esa razón, los datos de la velocidad del viento se basan en los valores medios de cada diez minutos o cada hora. También existen periodicidades con el día y la noche, cada ciclo anual y cada 11 años debido a las manchas solares. (Talayero y Telmo, 2011)

1.3. Escalas espaciales de los procesos atmosféricos

Las escalas en los movimientos de la atmósfera varían desde pequeños movimientos de centímetros hasta movimientos de masas enormes del tamaño de un continente. De acuerdo a Seinfeld y Pandis (2012) y Gallego et al. (2012) podemos dividir la escala de los movimientos atmosféricos en cuatro categorías para una clasificación más conveniente:

- **Microescala:** Fenómenos que suceden a escalas de 0 a 100 m y con una duración de alrededor de una hora o menos. Ejemplo de éstos son los remolinos causados por los edificios altos.
- **Mesoescala o escala regional:** Fenómenos que ocurren a escalas de 10 a 100 Km, con una duración de horas a días. Ejemplo de éstos son las brisas de mar, los vientos de montaña y las tormentas.
- **Escala sinóptica:** Movimientos que suceden a escalas que van de los cientos a los miles de kilómetros e involucra duraciones de hasta años. Engloba fenómenos como los sistemas de altas y bajas presiones, así como depresiones y anticiclones.
- **Escala global:** Fenómenos que ocurren a escalas que exceden los 5000 Km.

Aunque los fenómenos meteorológicos están divididos en éstas cuatro grandes categorías, es importante recordar que sucesos ocurridos en escalas pequeñas pueden tener repercusiones en escalas mayores.

Así mismo la mesoescala o escala regional también puede subdividirse en varias categorías. Las más famosas son las propuestas por Orlanski (1975) que incluye tres categorías:

- **Mesoescala alfa:** Abarca dimensiones de los 200 Km a los 2000 Km con una duración de 6 horas a 2 días. Incluye a fenómenos como corrientes en chorro, huracanes pequeños y anticiclones débiles.
- **Mesoescala beta:** Incluye dimensiones de los 20 Km a los 200 Km con una duración de 30 minutos a 6 horas. Incluye campos de vientos locales, vientos de montaña, brisas de tierra/mar, tormentas grandes.
- **Mesoescala gamma:** Sus dimensiones van de los 2 Km a los 20 Km con una duración de 3 a 30 minutos. Incluye a la mayoría de las tormentas, los cúmulos grandes y tornados muy grandes.

1.4. Tipos de pronóstico

De acuerdo al horizonte de pronóstico podemos clasificarlo en cuatro categorías, las cuales según AEMET (2018) son las siguientes:

- **Pronóstico inmediato o nowcasting:** Es el pronóstico a menor plazo, el cual abarca un lapso de dos o tres horas hasta 12 horas. Su nombre fue dado por

la Oficina de Meteorología del Reino Unido y es quien más utiliza este tipo de pronóstico.

- **Predicción a corto plazo:** Abarca una predicción de 12 a 72 horas a futuro.
- **Predicción a mediano plazo:** Es aquella que abarca desde los 3 a los 10 días a futuro. Aunque el Centro Europeo de Predicción a Mediano Plazo considera un plazo de hasta 15 días.
- **Predicción a largo plazo:** Es aquella que abarca desde varios meses hasta aproximadamente un año.

1.5. Modelos de Mesoescala

Los modelos regionales o de mesoescala son operados con un dominio restringido y se utilizan para la predicción a tiempos de corto plazo, es decir, de 1 a 3 días, y en periodos de mediano plazo que van de los 3 a los 10 días. En general, tienen resoluciones de 50 Km aproximadamente, lo que permite una representación más detallada de los fenómenos meteorológicos que la que pueden aportar los modelos globales; además incluyen parametrizaciones físicas avanzadas lo que contribuye a una mejor representación de los procesos físicos en el modelo. (Montoya, 2008)

Los modelos meteorológicos están formados por un conjunto de ecuaciones diferenciales parciales, además necesitan de un conjunto de datos iniciales para poder inicial la corrida. Una característica de los modelos regionales o de mesoescala es que son muy sensibles a los valores iniciales y también durante sus procesos de integración hay que

estarles suministrando todo el tiempo condiciones de contorno. Los datos iniciales que necesita el modelo pueden provenir de dos fuentes: ya sea un pronóstico anterior, o de datos meteorológicos de diferentes fuentes como estaciones meteorológicas, satélites, boyas marinas, etc. Estos datos se interpolan en los puntos de la grilla utilizando diferentes técnicas de interpolación (Cressman, Gándin), la interpolación de datos sucede en un espacio de cuatro dimensiones (x, y, z y t) por lo tanto se considera una análisis cuadrimensional. (Montoya, 2008)

Han existido y existen diferentes ejemplos de estos tipos de modelos regionales o de mesoescala, a continuación se presentan algunos de ellos, que de acuerdo a Saito (2007) y Windy (2021) tienen las siguientes características:

- **Modelo de mesoescala UKMO:** El modelo de mesoescala UKMO (United Kingdom Meteorological Office), a veces también referenciado como UM, es muy modelo tanto global como regional desarrollado para la región de Reino Unido, este modelo fue creado utilizando la formulación que Tapp y White publicaron en 1976. Estuvo en total operación de los años 1985 a 1993, en esa época su resolución era de 15 Km, pero ahora uno de sus modelos derivados (UKV) cuenta con una resolución de 1.5Km a 4Km, se corre cada 12 horas con un pronóstico a 3 días. Por su resolución es el modelo más confiable para el Reino Unido.
- **Modelo ALADIN - AROME:** El proyecto ALADIN (Aire Limitée Adaptation dynamique Développement International) fue patrocinado por Meteo-France con ayuda de algunos países de Europa Central y del Este. Como resultado de su co-

laboración con HIRLAM (High Resolution Limited Area Model), modelo creado para Europa del Norte como resultado de la cooperación entre 10 Institutos Meteorológicos Europeos, se crearon dos modelos regionales ALADIN y AROME, este último dirigido para la región de Francia. Los parámetros que proveen son presión, velocidad del viento, temperatura, humedad y precipitaciones. Su metodología esta basada en la dinámica de la atmósfera (hidrodinámica), termodinámica, radiación y física de las nubes. Se calcula una solución numérica aproximada de las ecuaciones de Navier-Stokes tomando en cuenta los procesos termodinámicos y los cambios de fase del agua en la atmósfera. Su versión más precisa alcanza una resolución de 2.5 Km. (Met Office, 2021)

- **Modelo JMA:** El modelo no hidrostático JMA (Japan Meteorological Agency) se trata de un modelo de mesoescala diseñado para la investigación y predicción numérica del clima en la región de Japón. Entró en operaciones en 2004 y cubre un dominio de 3600 km X 2880 km lo que incluye Japón y sus alrededores. Desde 2006 su resolución fue mejorada de 10 km a 5 km y corre cada hora para proveer de un pronóstico rápido de las precipitaciones.
- **Modelo NAM:** El modelo regional NAM (North American Mesoscale) es muy modelo desarrollado para Norteamérica por el American Weather Service. Se encuentra en operaciones desde 2004 y tiene una resolución de 12 km. Se corre cada 6 horas con un pronóstico de hasta 84 horas.
- **Modelo WRF-ARW:** El modelo WRF (Weather Research and Forecast) posee

dos versiones, la primera es WRF-NNM a cargo de NCEP (National Centers for Environmental Prediction) la cuál aún se encuentra disponible pero ya no cuenta con actualizaciones ni soporte técnico, la segunda es WRF-ARW (Advanced Research WRF) se encuentra a cargo principalmente de NCAR (National Center for Atmospheric Research) y es resultado de la colaboración entre diferentes institutos y organismos mayoritariamente de Estados Unidos. Fue desarrollado con fines de investigación pero actualmente su licencia es libre por lo que sus librerías y códigos pueden ser accesados por el público. Este modelo frecuentemente es usado para desarrollar otros modelos de predicción climática en regiones específicas.

El modelo WRF-ARW es el que se utiliza para desarrollar el presente trabajo por sus diversas ventajas entre las que están el ser de licencia libre y código abierto, entre sus desventajas están la complejidad de su ejecución y que no cuenta con una interfaz gráfica.

1.6. Situación de la energía eólica en Mexico y en el mundo

El cambio climático ha hecho cada vez más evidente la necesidad de transitar hacia fuentes de energía alternativas. La ventaja que éstas presentan frente a otras fuentes de energía tradicionales como el petróleo, carbón y gas, es que se encuentran disponibles para todos los países, ya sean de pequeña, mediana o grande economía.

A diferencia del siglo XVIII y XIX donde la revolución industrial fue sinónimo de un uso indiscriminado de recursos naturales, derivando en contaminantes, el panorama que se busca a futuro es un desarrollo tecnológico de manera sustentable, lo cual se ve posible,

ya que con el avance tecnológico cada vez es más accesible y menos costo llevar a cabo un proyecto que involucre energías limpias.

De acuerdo al *Annual Wind Report* del 2019, las nuevas instalaciones de energía eóli-

Historic development of total installations

MW, onshore	New installations 2018	Total installations 2018	New installations 2019	Total installations 2019
Total onshore	46,345	567,592	54,206	621,421
Americas	11,891	134,843	13,427	148,072
USA	7,588	96,488	9,143	105,436
Canada	566	12,816	597	13,413
Brazil	1,939	14,707	745	15,452
Mexico	929	4,935	1,281	6,215
Argentina	445	673	931	1,604
Chile	204	1,619	526	2,145
Other Americas	220	3,605	204	3,807
Africa, Middle East	970	5,728	944	6,673

Figura 1.4: Total de instalaciones eólicas. Tomado de “Global Wind Report 2019” por Lee, J. y Zhao, F., 2020. Global Wind Energy Council. Brussels, Belgium.

ca mundiales sobrepasaron los 60GW (Gigawatts), lo que representa un crecimiento del 19% comparado al año anterior, lo que da un total de generación mundial de 650 GW. Colocando a la energía eólica en un papel liderante dentro de las energías limpias para lograr el objetivo de cero emisiones de carbono. En México también ha habido un crecimiento en el uso de energía eólica, en 2018 se tenía 4 935 instalaciones, en 2019 se agregaron 1281 instalaciones, dando un total de 6 215 instalaciones (Figura 1.4), lo cual representa el 2% de las nuevas instalaciones a nivel mundial (Figura 1.5), poniendo a México como uno de los líderes de generación de energía eólica en América Latina, con

Top markets 2019

New installations onshore (%)

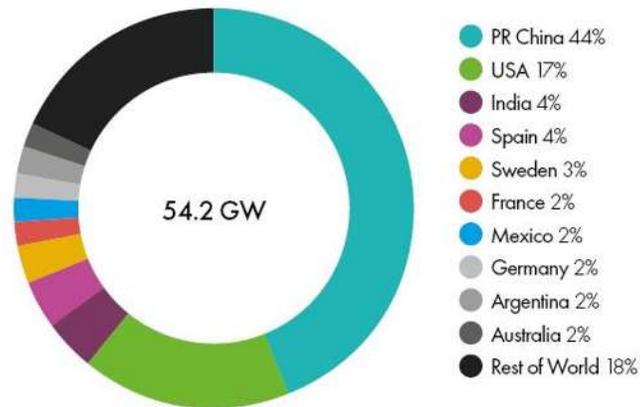


Figura 1.5: Nuevas instalaciones eólicas. Tomado de “Global Wind Report 2019” por Lee, J. y Zhao, F., 2020. Global Wind Energy Council. Brussels, Belgium.

instalaciones similares en número a países como Australia y mayores a Japón. (Lee y Zhao, 2020)

Es importante señalar que México es firmante del Acuerdo de París que tiene como objetivo reducir las emisiones de carbono en el mundo, acuerdo que ratificó en 2019 con el cambio de gobierno en el cual se compromete a reducir el 22 % de las emisiones de gases de efecto invernadero al 2030, así como una reducción del 51 % de las emisiones de carbón negro. (Gobierno de México, 2019)

En la actualidad, en México hay 50 plantas eólicas en función, cuya capacidad instalada alcanza los 5 mil MW (Megawatts), pero se calcula que el potencial eólico del país es de alrededor de 70 mil MW, el equivalente al 70 % de la generación de energía que se produce actualmente. (AMDEE, 2019)

Actualmente, el estado de Michoacán no se encuentra incluido dentro de los estados generadores de energía eólica, pero investigaciones recientes han mostrado que existe un potencial de generación de energía eólica en Tepuxtepec, lo suficientemente grande para la generación comercial. (Castañeda, 2018)

1.7. Funcionamiento de los parques eólicos

Los parques eólicos, en específico los parques eólicos terrestres son infraestructuras encargadas de producir energía eléctrica a partir del viento que se produce en un emplazamiento en tierra. Son capaces de transformar la energía cinética del viento en energía eléctrica para después convertirle en electricidad apta para el consumo e integrarla a la red de distribución eléctrica. (Iberdrola, 2020)

Un parque eólico funciona de la siguiente manera (Figura 1.6), la fuerza del viento hace girar las aspas del aerogenerador, que están diseñadas para captar el máximo de la energía cinética del viento. Las aspas están unidas a la turbina a través del buje, que a su vez está conectado al eje lento, que gira a la misma velocidad de las aspas entre 7 y 12 revoluciones por minuto. Una multiplicadora eleva esa velocidad más de 100 veces y la transfiere al eje rápido que se mueve a más de 1.500 revoluciones por minuto. Dicha fuerza se transmite al generador, donde la energía cinética se transforma en energía eléctrica. De ahí pasa al convertidor, que la transforma en corriente alterna. La energía eléctrica producida es de baja tensión, por lo que se conduce a un transformador que la eleva a media tensión, es decir, entre 20kV y 66 kV. De ahí se lleva a la subestación donde se convierte en corriente de alto voltaje (más de 132 kV). Es entonces cuando la electricidad

es apta para el consumo, la cual se trasfiere a la red de distribución. (Iberdrola, 2020)

Para decidir instalar una parque eólico se deben tomar en cuenta los siguientes aspectos, el impacto ambiental, el potencial energético de la zona, variación del viento, topografía del lugar, además lo común es instalarlos en una zona despoblada para evitar que el ruido moleste a los habitantes. Existen modelos meteorológicos que permiten pronosticar su potencial energético. (Iberdrola, 2020)

Las ventajas que presentan los parques eólicos respecto a otras formas de producción de energía es que se trata de una energía renovable, limpia e inagotable; contribuye a reducir los efectos del cambio climático. No generan gases tóxicos, los costos de mantenimiento de los aerogeneradores son bajos, no interrumpen las actividades agrícolas y ganaderas.

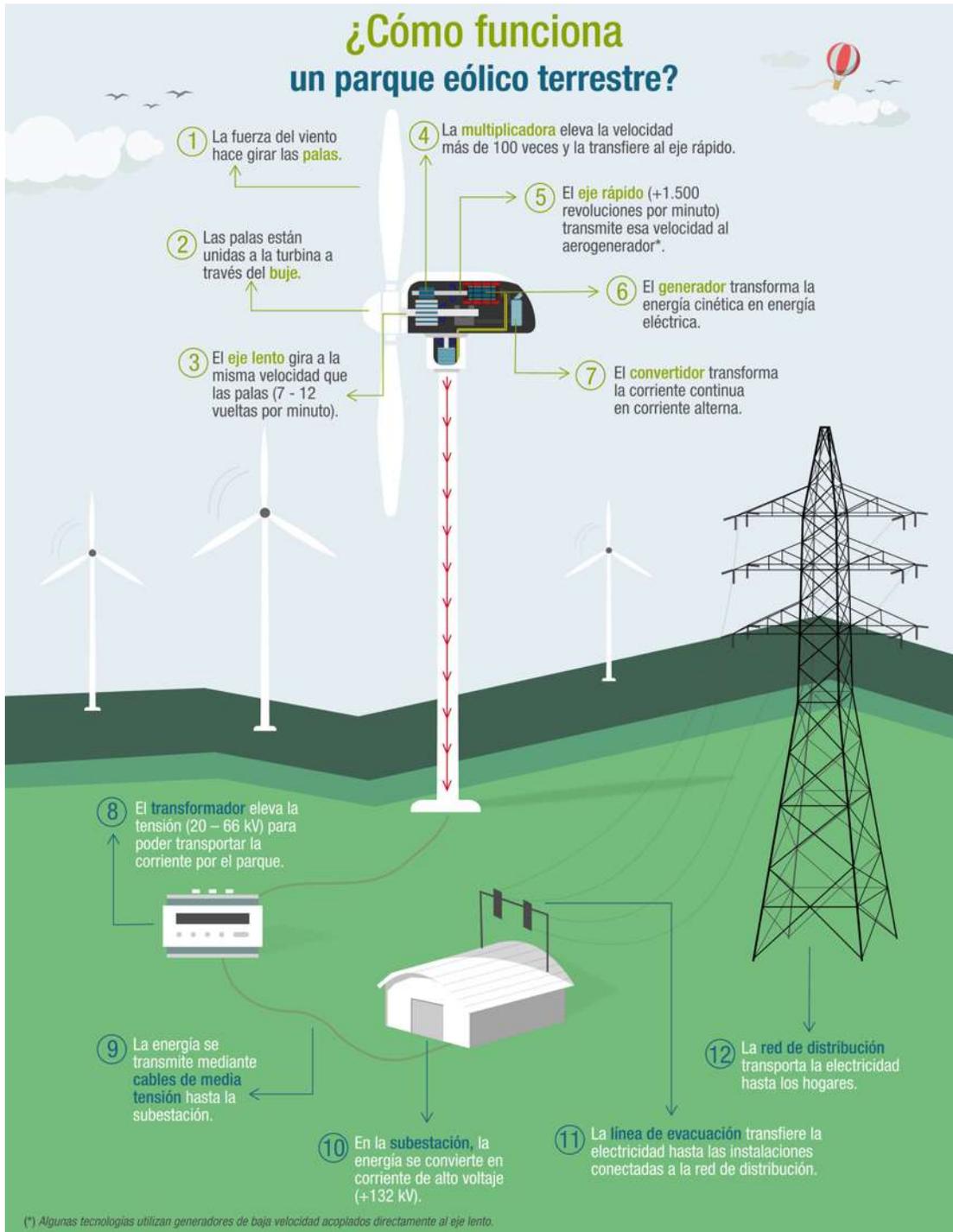


Figura 1.6: Funcionamiento parque eólico. Tomado de “Sabes cómo funcionan los parques eólicos terrestres?” por Iberdrola, 2021.

Capítulo 2

Modelos NWP (Numerical Weather Prediction) y la herramienta WRF (Weather Research Forecast)

2.1. Antecedentes

Se puede decir que uno de los avances científicos más importantes de las últimas décadas es el poder simular sistemas físicos complejos mediante modelos numéricos. Los actuales modelos de predicción tienen el poder de replicar las condiciones climáticas de manera precisa. Lo cual ha cobrado relevancia sobre todo con el aumento de generación de energía mediante fuentes de energía renovables, ello aunado a condiciones climáticas cambiantes debido al cambio climático.

Los comienzos de la predicción climática con un acercamiento matemático se remontan al siglo XIX con el desarrollo de la termodinámica y los principios físicos que la rigen. En 1890 el meteorólogo Cleveland Abbe (Fig. 2.1 Izquierda) afirmó que la "meteorología es esencialmente la aplicación de la hidrodinámica y termodinámica a la atmósfera". En su publicación *The physical basis of long-range weather forecasting* propone una predicción con un enfoque matemático y espera que en el futuro las ecuaciones puedan solucionarse

CAPÍTULO 2. MODELOS NWP (NUMERICAL WEATHER PREDICTION) Y LA HERRAMIENTA WRF (WEATHER RESEARCH FORECAST)

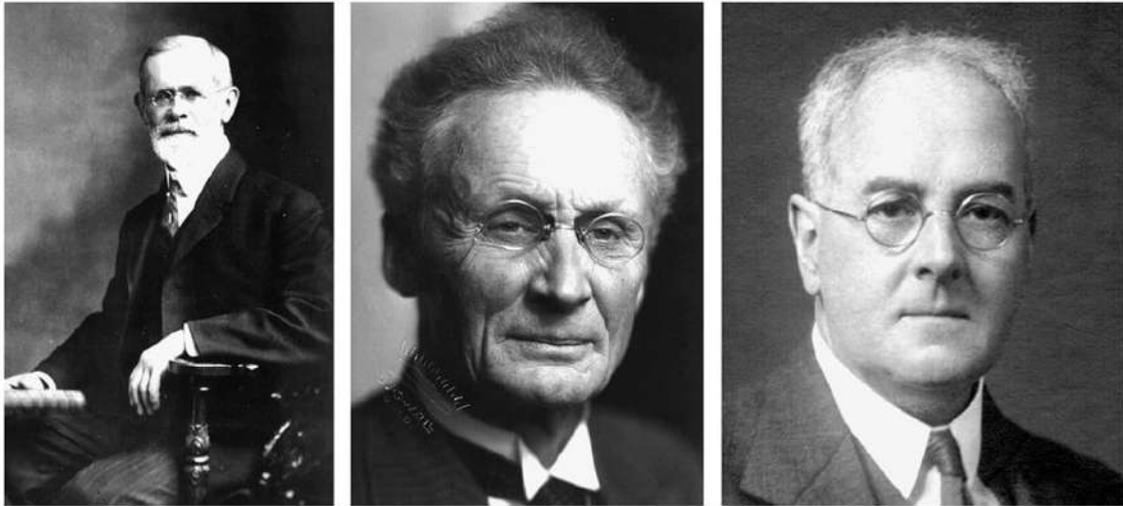


Figura 2.1: Izquierda: Cleveland Abbe (1838-1916). Centro: Vilhelm Bjerknes (1862-1951). Derecha: Lewis Fry Richardson (1881-1953). Tomado de "The origins of computer weather prediction and climate modeling" por Lynch, P., 2007, *Journal of Computational Physics*, 227(2008), 3431-3444.

ya sea de manera gráfica, analítica o numérica, algo difícil de realizar para su época. (Lynch, 2007)

Tiempo después el científico noruego Vilhelm Bjerknes (Fig. 2.1 Centro) establece un plan de predicción que consistía en dos partes, la primera era un diagnóstico en el cual se establecía las condiciones iniciales de la atmósfera mediante observaciones, la segunda parte consistía en un pronóstico donde, utilizando las leyes de la física, se calculaba cómo el estado cambiaba durante un tiempo. Además propuso siete ecuaciones independientes necesarias para el pronóstico: tres ecuaciones de la hidrodinámica, la ecuación de continuidad, la ecuación de estado y las ecuaciones que expresan el primer y segundo principio de la termodinámica; así como siete variables básicas: presión, temperatura, densidad, humedad y la velocidad del viento con sus tres componentes. Bjerknes desarrolló un método de solución de manera gráfica porque le fue imposible resolverlo de

CAPÍTULO 2. MODELOS NWP (NUMERICAL WEATHER PREDICTION) Y LA HERRAMIENTA WRF (WEATHER RESEARCH FORECAST)

manera numérica y una solución analítica estaba fuera de consideración, a pesar de lo interesante de su propuesta ésta no pudo ponerse en práctica. (Lynch, 2007)

En 1913, los trabajos de Bjerknes llegan a ser del conocimiento del científico inglés Lewis Fry Richardson (Fig. 2.1 Derecha), Richardson propone un esquema de predicción donde implementa de manera precisa y detallada la parte del pronóstico del plan de Bjerknes, éste incluía una cantidad increíble de cálculos numéricos, impráctico para su época, lo cual justificaría de la siguiente manera: *El esquema es complicado porque la atmósfera es complicada. Pero esto no lo desalentaría respecto al futuro: Tal vez algún día en el futuro será posible que los cálculos se realicen más rápido que lo que cambia la atmósfera... pero ese es el sueño.* La idea de Richardson era expresar los principios físicos que rigen el comportamiento de la atmósfera como un sistema de ecuaciones matemáticas y aplicar su método de diferencias finitas para resolver el sistema, las ecuaciones ya habían sido previamente identificadas por Abbe y Bjerknes, y Richardson ya había tenido éxito resolviendo ecuaciones diferenciales utilizando un método gráfico y numérico. (Lynch, 2007)

La idea fundamental de Richardson es que los valores de la atmósfera (presión, velocidad, etc.) sean tabulados para ciertas latitudes, longitudes y alturas, dando una descripción general del estado de la atmósfera en un instante, estos valores son procesados por un método aritmético para dar nuevos valores después de un tiempo Δt , y así sucesivamente para otros tiempos $2\Delta t$, $3\Delta t$, etc. A Richardson no sólo le preocupaba que su modelo tuviera rigor técnico, si no que también pudiera ser puesto en práctica. Así que utilizando los mejores datos que tenía disponibles decidió calcular el cambio en la presión.

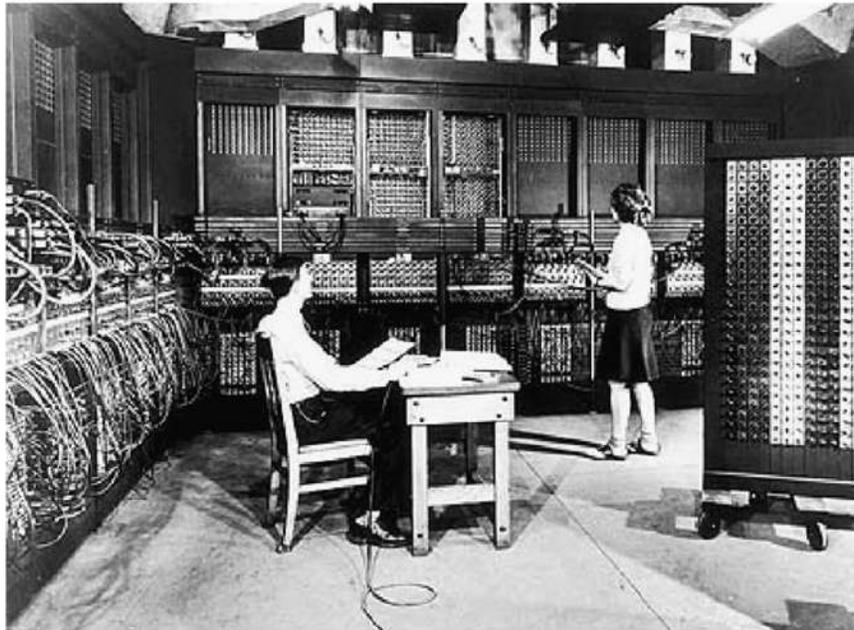


Figura 2.2: Computadora ENIAC (Electronic Numerical Integrator and Computer). Tomado de "The origins of computer weather prediction and climate modeling" por Lynch, P., 2007, *Journal of Computational Physics*, 227(2008), 3431-3444.

Tristemente los resultados que obtuvo fueron catastróficos obteniendo valores totalmente irreales. Esto contribuyó a que al pasar de los años su trabajo fuera poco seguido a pesar de las buenas críticas que recibió en su época y lo bueno de su propuesta. Ahora se sabe que esos valores tan irreales que obtuvo no se debieron a que su propuesta fuera errónea, sino a la falta de un proceso extra llamado *inicialización*, que todos los modelos actualmente de predicción incluyen. A pesar de no haber obtenido los resultados que hubiera querido, el trabajo de Richardson se considera el fundamento en el cuál se construyen los modelos de predicción climática actuales los cuales funcionan de manera similar a su propuesta. (Lynch, 2007)

En 1930 el matemático John von Neumann se interesó por el flujo de fluidos turbulentos especialmente por las ecuación diferenciales parciales no lineales que lo describen,

CAPÍTULO 2. MODELOS NWP (NUMERICAL WEATHER PREDICTION) Y LA HERRAMIENTA WRF (WEATHER RESEARCH FORECAST)

se dió cuenta que habría grandes avances en la hidrodinámica si hubiera una solución numérica a esas ecuaciones complejas, y le fue claro que para ello necesitaba de una computadora mucho más rápida. Entre 1946 y 1952 Neumann se dedicó a diseñar y construir una computadora electrónica en el Instituto de Estudios Avanzados (IAS) en Princeton, este proyecto estaba dirigido a cuatro objetivos: Ingeniería, Lógica y programación, Matemáticas, y Meteorología. Al mismo tiempo hizo una solicitud formal al Ejército de E.U. para recibir financiamiento, su propuesta fue exitosa en conseguir apoyo y en julio de 1946 el Proyecto de Investigación Meteorológica comenzó. (Lynch, 2007)

Para 1950 ya se tenía el análisis matemático necesario y ya se contaba con el diseño de un algoritmo numérico, entonces se hicieron los arreglos necesarios para llevar a cabo la integración en la única computadora disponible, la ENIAC (Electronic Numerical Integrator and Computer), ubicada en Aberdeen, Maryland (Figura 2.2). Le tomó a la computadora 24 horas realizar un pronóstico de 24 horas, es decir, se logró ir al ritmo de la atmósfera. Los buenos resultados obtenidos generaron gran interés y elevaron las expectativas, lo que provocó que se crearan diferentes grupos de investigación alrededor del mundo, investigaciones que dieron como resultado que se desarrollaran diferentes modelos de predicción. (Lynch, 2007)

2.2. Modelos NWP (Numerical Weather Prediction)

Los modelos NWP (Numerical Weather Prediction) son programas de computadora que resuelven las ecuaciones que describen los procesos atmosféricos y cómo la atmósfera cambia con el tiempo. En 1904 Vihelm Bjerknes reconoció que la predicción climática

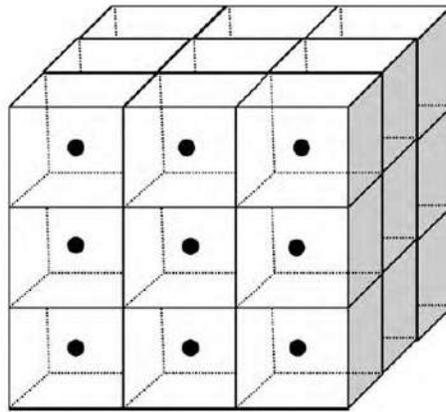


Figura 2.3: Cubos 3D de la atmosfera usados por los modelos NWP. Tomado de “Review of the use of Numerical Weather Prediction (NWP) Models for wind energy assessment” por Al-Yahyai, S., Charabi, Y., Gastli, A., 2010, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(2010), 3192-3198.

podía verse como un problema de valor inicial. Si las condiciones iniciales de la atmósfera son conocidas entonces la ecuación de cada variable atmosférica puede resolverse aplicando las fuerzas físicas que actúan sobre ellas para obtener nuevos valores de estas variables en un tiempo posterior. Debido a la no linealidad de las ecuaciones, una solución numérica es preferible sobre una solución analítica. (Al-Yahyai, Charabi y Gastli, 2010)

Los modelos NWP dividen a la atmósfera en cubos 3D (Fig. 2.3), los puntos de la malla se encuentra en el medio del cubo. La distancia entre cada punto adyacente se le conoce como la resolución, a mayor resolución el modelo es más exacto, pero eso también significa un mayor costo computacional. (Al-Yahyai et al., 2010)

Los modelos NWP se dividen en dos tipos: los modelos globales y los modelos limitados a una cierta región (Fig. 2.4). Debido a las limitaciones computacionales sólo unos pocos

CAPÍTULO 2. MODELOS NWP (NUMERICAL WEATHER PREDICTION) Y LA HERRAMIENTA WRF (WEATHER RESEARCH FORECAST)

Type	Models
Climate	IGCM · HadCM3 · GFDL CM2.X · CGCM · CCSM · ECHAM
Global	IFS · GEM · GFS · NOGAPS · UM · JMA · GME · ARPEGE
Regional	MM5 · NAM · RUC · RAMS · WRF · RAQMS · HIRLAM · LAPS

Figura 2.4: Diferentes modelos NWP. Tomado de “Review of the use of Numerical Weather Prediction (NWP) Models for wind energy assessment” por Al-Yahyai, S., Charabi, Y., Gastli, A., 2010, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(2010), 3192-3198.

modelos globales son utilizados y estos se utilizan en bajas resoluciones. Los modelos limitados a una cierta área también llamados modelos regionales o de mesoescala, necesitan menor poder computacional y cuentan con mayor resolución, estos modelos son utilizados para el pronóstico de fenómenos meteorológicos en mesoescala. Por otra parte, debido a su cobertura limitada, estos modelos necesitan de las condiciones de frontera de los modelos globales. (Al-Yahyai et al., 2010)

2.3. Ecuaciones Primitivas

Todos los modelos NWP (Numerical Weather Prediction) actuales funcionan similarmente asumiendo que la atmósfera es conservativa, es decir, que hay una conservación de la masa, energía y momento, por lo tanto las ecuaciones que la describen y en la que se basan los modelos numéricos son las siguientes:

Ecuación de Estado

$$p = \rho r_d T_v \quad (2.1)$$

donde p es la presión atmosférica,
 r_d es la constante termodinámica del aire seco,
 T_v es la temperatura del aire.

Conservación de la energía

$$\delta c = \delta W_T + \delta u_e = \frac{S_c}{\rho} dt \quad (2.2)$$

donde δc es el calor intercambiado en un proceso por unidad de masa de un cierto volumen de aire,

δW_T es el trabajo por unidad de masa ejercido por el volumen de aire en este proceso,

δu_e es la variación de energía interna por unidad de masa del volumen de aire durante el proceso,

S_c es el termino de fuentes y sumideros de energía por unidad de volumen y tiempo.

Conservación del momento

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho u_i + \frac{\partial}{\partial x_j} \rho u_j u_i = -\frac{\partial p}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right] + \rho g_i - 2\rho \epsilon_{ijk} \Omega_j u_k \quad (2.3)$$

donde μ es la viscosidad molecular del aire,

g_i representa a la gravedad,

Ω es la velocidad angular de la tierra

Conservación de la masa

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = -\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dt} \quad (2.4)$$

donde x_i representa a las coordenadas espaciales,

t el tiempo,

u_i las componentes del vector del viento,

ρ es la densidad del aire

2.4. Descripción de la herramienta WRF (Weather Research Forecast)

El programa WRF (*Weather Research Forecasting*) es un modelo NWP (*Numerical Weather Prediction*). El sistema fue desarrollado para cumplir funciones tanto operacionales como de investigación. WRF es una colaboración de diferentes instituciones como

CAPÍTULO 2. MODELOS NWP (NUMERICAL WEATHER PREDICTION) Y LA HERRAMIENTA WRF (WEATHER RESEARCH FORECAST)

la División de Meteorología a Mesoescala y Microescala (MMM) del Centro Nacional de Investigaciones Atmosféricas NCAR (National Center for Atmospheric Research), el Centro Nacional para Predicción Ambiental NCEP (National Centers for Environmental Prediction) y el Laboratorio de Investigación del Sistema Tierra (ESRL) de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) principalmente, así como por la Agencia Climática (AFWA) y Laboratorio de Investigación Naval (NRL) de la Fuerza Aérea del Departamento de Defensa, el Centro para el Análisis y Predicción de Tormentas (CAPS) de la Universidad de Oklahoma, la Administración Federal de Aviación (FAA) y la comunidad científica universitaria. (Skamarock, Klemp, Dudhia, Gill, Barker, Duda, Huang, Wang y Powers, 2008)

El modelo WRF como se observa en la imagen [2.4](#) es un modelo regional, es decir, con un relativo bajo costo computacional se pueden obtener resultados con una buena resolución.

Entre las características a destacar de WRF se encuentran el ser de licencia libre, es decir, basta con sólo ingresar a su pagina web para tener acceso a sus diferentes versiones, librerías, actualizaciones y demás recursos ofrecidos por sus desarrolladores; también es de código abierto, lo que permite adaptar la herramienta de acuerdo a los objetivos planeados, así como modificar los tipos de archivos a utilizar.

El modelo WRF (Weather Research and Forecast) posee dos versiones, la primera es WRF-NNM a cargo de NCEP (National Centers for Environmental Prediction) la cuál aún se encuentra disponible pero ya no cuenta con actualizaciones ni soporte técnico, la

CAPÍTULO 2. MODELOS NWP (NUMERICAL WEATHER PREDICTION) Y LA HERRAMIENTA WRF (WEATHER RESEARCH FORECAST)

segunda es WRF-ARW (Advanced Research WRF) se encuentra a cargo principalmente de NCAR (National Center for Atmospheric Research), siendo ésta la herramienta que se utilizará para desarrollar el presente modelo de pronóstico.

Podemos decir que esta dividido en 3 grandes segmentos:

- El Sistema de Pre-procesamiento de WRF (WRF Pre-processing System) o WPS por sus siglas en inglés.
- Solucionador WRF-ARW, a veces solamente llamado Solucionador ARW (Advanced Research WRF)
- El Post-procesamiento y las herramientas de visualización.

El la figura 2.5 se presenta un esquema de las diferentes partes y programas que conforman WRF y cómo se entrelazan entre sí.

WPS (WRF Preprocessing System)

WPS es usado principalmente para simulaciones de datos reales. Consiste de tres programas: *geogrid*, *ungrib* y *metgrid*, cuya función colectiva es hacer los preparativos necesarios para la ejecución del programa *real.exe* para la simulación de datos reales. Entre sus funciones incluye definir el dominio de la simulación; interpolar los datos terrestres, tales como el tipo de suelo, topografía, etc., en el dominio de la simulación; y extraer e interpolar los datos meteorológicos obtenidos de manera externa en el dominio de la simulación (Skamarock et al., 2008)

CAPÍTULO 2. MODELOS NWP (NUMERICAL WEATHER PREDICTION) Y LA HERRAMIENTA WRF (WEATHER RESEARCH FORECAST)

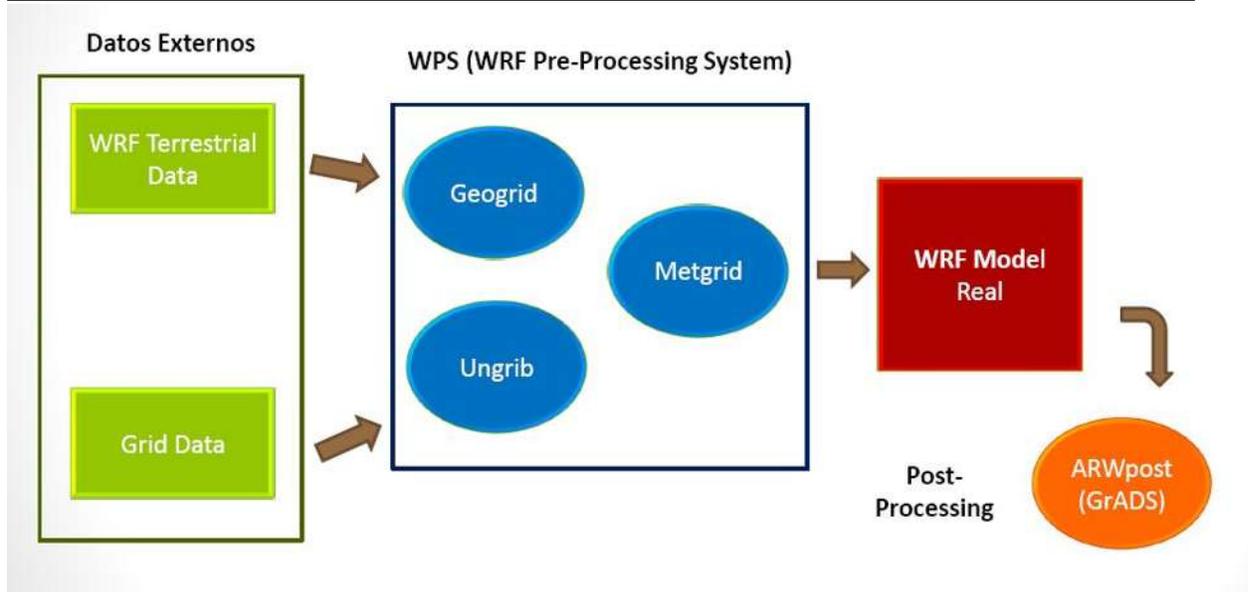


Figura 2.5: Esquema del funcionamiento de WRF. Adaptado de “A Description of the Advanced Research WRF Version 3” por Skamarock, W., Klemp, J., Dudhia, J., Gill, D., Barker, D., Duda, M., Huang, X., Wang, W., y Powers, J., 2008. National Center for Atmospheric Research.

El propósito de **geogrid** es definir el dominio de la simulación, es decir, la extensión territorial y ubicación geográfica del lugar donde se llevará a cabo la simulación. Para ello se necesita de información externa del tipo topográfica y geográfica, la cuál es provista por la misma herramienta de WRF. Esta información externa viene en dos versiones dependiendo de la capacidad de almacenamiento que se tenga, la primera es una versión con menor resolución pero de menor tamaño, la segunda es la versión completa con mejor resolución pero de mayor tamaño. La definición del dominio se hace al editar el archivo *namelits.wps*. (Skamarock et al., 2008)

También en esta sección se define el tipo de proyección cartográfica más conveniente a utilizar, entre las cuales se puede elegir la proyección Lambert (Figura 2.6 arriba izquierda) que se ajusta bien para zonas que se ubican en latitudes medias pero no apta

CAPÍTULO 2. MODELOS NWP (NUMERICAL WEATHER PREDICTION) Y LA HERRAMIENTA WRF (WEATHER RESEARCH FORECAST)

para zonas en los polos; la proyección Mercator (Figura 2.6 arriba derecha) conveniente para zonas de latitudes bajas cercanas al ecuador; la proyección Estereográfica Polar (Figura 2.6 abajo izquierda) buena para latitudes altas que incluyan a los polos; y la proyección Cilíndrica Equidistante (Figura 2.6 abajo derecha) requerida para modelos globales. (Duda, 2021)

También se necesita de otro tipo de información externa, se trata de los archivos .GRIB, también llamados datos de reanálisis, que básicamente son los archivos iniciales de datos reales meteorológicos necesarios para cualquier simulación numérica del clima. Estos archivos se consiguen mediante las bases de datos provistas por diferentes institutos dedicados al estudio de la atmósfera, como NCEP, UCAR, etc., obtenidos de diferentes maneras como mediante monitoreos satelitales, boyas meteorológicas, etc. Es importante señalar que al menos a la fecha de realización de esta investigación, estas bases de datos son de acceso público, sólo se necesita un breve registro explicando la finalidad de su uso.

El programa **ungrib** se encarga de leer los archivos .GRIB, extraerle la información que se necesita y reescribirla en un formato intermedio más simple cuyo nombre es a libre elección, el cual se designa editando el archivo *namelits.wps*. La razón de este proceso es que los archivos .GRIB al contener información meteorológica global, generalmente contienen mucha más información de la que WRF necesita para su ejecución. Los archivos .GRIB poseen varios códigos para identificar las variables meteorológicas que contienen. Ungrib usa tablas de conversión de esos códigos al momento de decidir que información extraer del archivo .GRIB y reescribir en el formato intermedio. (Skamarock et al., 2008)

CAPÍTULO 2. MODELOS NWP (NUMERICAL WEATHER PREDICTION) Y LA HERRAMIENTA WRF (WEATHER RESEARCH FORECAST)

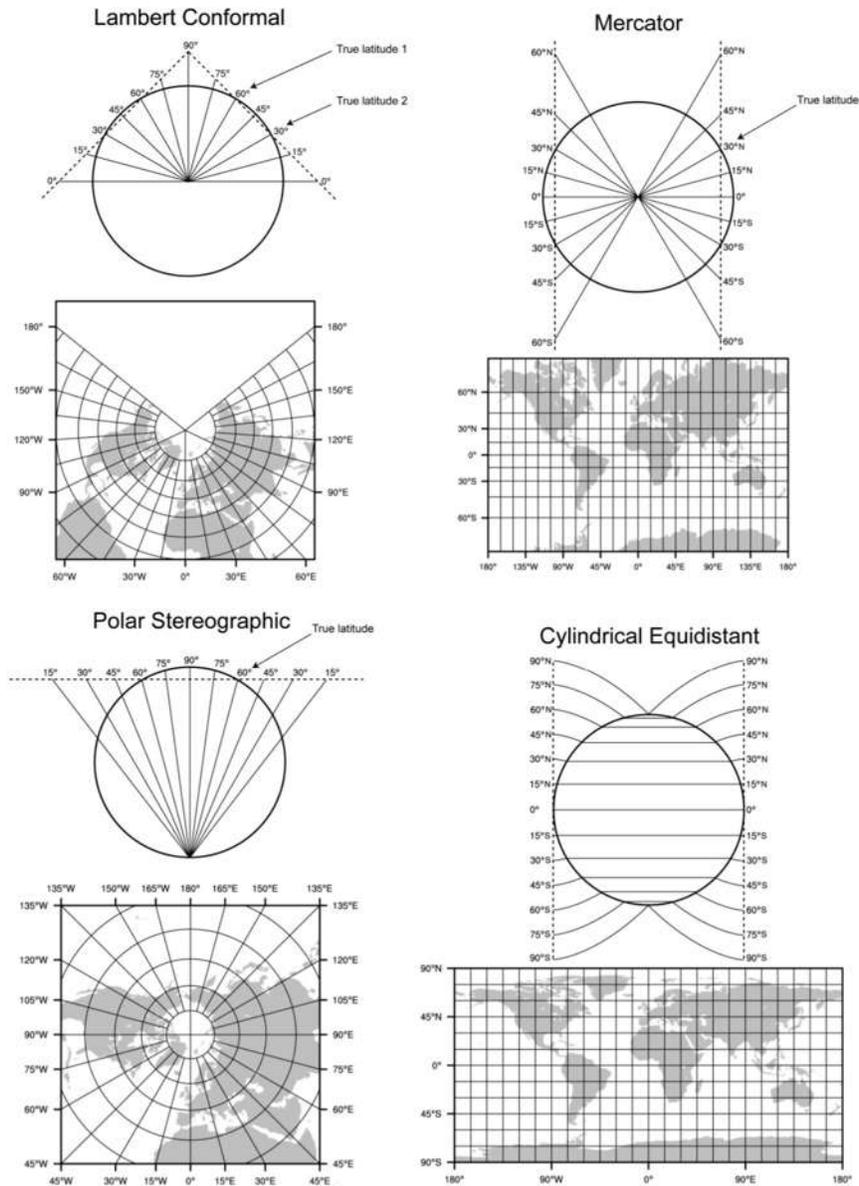


Figura 2.6: Tipos de proyecciones: Lambert (arriba izquierda), Mercator (arriba derecha), Estereográfica Polar (abajo izquierda) y Cilíndrica Equidistante (abajo derecha). Tomado de “The WRF Pre-Processing System (WPS): Fundamental Capabilities” por Duda, M., 2021. WRF User’s Tutorial January 2021. UCAR.

El programa **metgrid** interpola horizontalmente la información meteorológica contenida en los archivos de formato intermedio que fue extraída por *ungrib* y la coloca en el dominio definido por *geogrid*. El rango de los datos interpolados son definidos en el archivo editable *namelits.wps*. Este programa es el ultimo de los tres programas que conforman WPS, cuyo resultados son los archivos de salida MET, listos para ser usados por ARW. (Skamarock et al., 2008)

Aunque WRF no está diseñado para ser usado con una interfaz gráfica y su uso se basa en líneas de comandos, la parte del proceso WPS si cuenta con una interfaz gráfica llamada *WRF Domain Wizard*¹ que permite visualizar parte del proceso, especialmente al designar el tamaño del dominio, lamentablemente debido a problemas con las ultimas actualización de Java™ el programa no logra conectarse con el servidor para su utilización.

Solucionador WRF-ARW

El modelo WRF es un modelo no hidrostático. Los **modelos hidrostáticos** consideran que existe un equilibrio hidrostático, es decir, que las fuerzas del gradiente vertical de presión provocadas por el movimiento del aire al moverse de una zona de alta presión cerca de la superficie a una altura de baja presión, están en equilibrio con la fuerza de gravedad:

$$\frac{\delta P}{\delta z} = -\rho g$$

¹<https://esrl.noaa.gov/gsd/wrfportal/DomainWizard.html>

CAPÍTULO 2. MODELOS NWP (NUMERICAL WEATHER PREDICTION) Y LA HERRAMIENTA WRF (WEATHER RESEARCH FORECAST)

donde P es la presión, z las coordenada vertical, ρ la densidad y g la gravedad.

A escala sinóptica se puede considerar que la atmósfera se encuentra en equilibrio hidrostático, sin embargo con fenómenos de mesoescala, que requieren mayor resolución, no podemos considerar tales equilibrios, razón por la cuál se usa **modelos no hidrostáticos**, que consideran fenómenos como el empuje hidrostático y los efectos que la topografía puede tener, especialmente para estructuras de menos de 10km. (COMET, 2011)

El modelo WRF usa los esquemas de integración numérica Runge-Kutta de 2do y 3er orden. WRF-ARW consiste de dos programas: un programa de inicialización llamado *real.exe* y el programa de integración numérica *wrf.exe*, no es casualidad que este ultimo programa lleve por nombre *wrf.exe* ya que éste es el programa medular del modelo WRF, donde se lleva a cabo la integración de cada uno de los punto de la malla en que se ha dividido la atmósfera, y tampoco es sorpresa que *wrf.exe* sea el programa que mayores recursos computacionales necesita y el que mayor tiempo de compilación conlleva.

Al igual que con WPS, aquí también se cuenta con un archivo editable llamado *namelist.input* que debe compartir algunas opciones ya definidas en la *namelist.wps* de WPS, como el tamaño del dominio, su resolución y la temporalidad del pronóstico. Pero no sólo eso, lo más importante es que aquí se definen las opciones de la física (&physics) y dinámica (&dynamics) atmosférica del modelo que se muestran en la figura 2.7, muy importantes para obtención de un buen pronóstico.

Al final de estos dos procesos obtenemos archivos WRFOUT, los cuales contienen el pronóstico tan deseado.

CAPÍTULO 2. MODELOS NWP (NUMERICAL WEATHER PREDICTION) Y LA HERRAMIENTA WRF (WEATHER RESEARCH FORECAST)

&physics	
mp_physics	Opciones de microfísica.
ra_lw_physics	Opción de radiación de onda larga: determina el cálculo de los flujos de radiación ascendente y descendente de cielo despejado y de nubes.
ra_sw_physics	Opción de radiación de onda corta.
radt	Minutos entre llamadas de física de radiación.
sf_sfclay_physics	Opciones físicas de la capa superficial.
sf_surface_physics	Opciones del modelo de superficie terrestre (LSM).
bl_pbl_physics	Opción de capa límite planetaria (PBL): se utiliza para distribuir flujos superficiales con flujos de remolino de capa límite.
cu_physics	Opciones de parametrización de nubes.
cudt	Minutos entre llamadas de física de nubes.
isfflx	Opción que determina los flujos de calor y humedad de la superficie.
ifsnow	Esta opción se puede desactivar para eliminar los efectos de la nieve para el modelo de suelo simple.
icloud	Opciones para calcular la fracción de nubes para la radiación.
surface_input_source	Datos sobre el uso de la tierra y la categoría del suelo.
num_land_cat	El número de categorías de tierra de acuerdo a geogrid.
sf_urban_physics	Opciones que determina qué efectos urbanos se utilizan.
sf_ocean_physics	Configuración opcional que determina qué modelo oceánico se utiliza.
&dynamics	
w_damping	Amortiguación de velocidad vertical.
diff_opt	Opciones de turbulencia y mezclado.
km_opt	Opciones del coeficiente de remolino
diff_6th_opt	Difusión numérica de 6º orden.
diff_6th_factor.	Razón adimensional de difusión numérica 6º orden
base_temp	Temperatura del nivel del mar (superficie) del estado base (en K).
damp_opt	Amortiguación de nivel superior.
zdamp	Profundidad de amortiguación.
dampcoef	Coeficiente de amortiguación.
khdif	Constante de difusión horizontal (m ² /s)
kvdif	Constante de difusión vertical (m ² /s)
non_hydrostatic	Modelo en modo hidrostático o no hidrostático.
moist_adv_opt	Advección positiva o monótona para ayudar a eliminar la predicción de humedad excesiva o insuficiente
scalar_adv_opt	Advección positiva de escalares.

Figura 2.7: Opciones dinámicas y físicas de WRF-ARW contenidas en la namelist.wps. Adaptado de “A Description of the Advanced Research WRF Version 3” por Skamarock et al., 2008. National Center for Atmospheric Research.

Post-Procesamiento

Existen una diversidad de herramientas para el procesamiento de los datos obtenidos después de la compilación del modelo de pronóstico (Werner, 2021). A continuación se muestra algunos de ellos:

- **Ncview:** Es una interfaz gráfica que permite la rápida visualización de archivos netCFD. Contiene todas las variables. Permite la lectura de archivos *geo_em*, *met_em*, *wrfinput*, *wrfout*, *wrfrst*. La desventaja es que sólo se puede utilizar en el sistema operativo Linux y no está disponible para Windows.

http://meteora.ucsd.edu/pierce/ncview_home_page.html

- **RIP:** Es el acrónimo de Read Interpolate Plot. Es una herramienta de post-procesamiento que genera gráficas. Requiere de las librerías gráficas de NCAR. Dirigido a modelos numéricos de mesoescala.

<http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/ripug>

- **ARWpost:** Un convertidor que crea archivos de salida para que sean leídos por el software GrADS para la creación de mapas y gráficas. <http://cola.gmu.edu/grads/>

- **VAPOR:** Es el acrónimo para Visualization and Analysis Platform for Ocean, Atmosphere, and Solar Researchers. Fue desarrollado por NCRA para proveer una visualización interactiva. La versión actual cuenta con varias herramientas como la visualización en 3D y el cálculo de variables. <http://www.vapor.ucar.edu/>

La decisión de que herramienta de post-procesamiento es la más conveniente a utilizar se

CAPÍTULO 2. MODELOS NWP (NUMERICAL WEATHER PREDICTION) Y LA HERRAMIENTA WRF (WEATHER RESEARCH FORECAST)

debe basar en la finalidad que se le dará a los datos arrojados por el modelo de pronóstico.

También es importante considerar que si se trabaja con un sistema operativo Linux,

Ncview es una buena opción; por el contrario, si se trabaja con un sistema operativo

Windows, GrADS es una opción mejor.

Capítulo 3

Desarrollo del modelo de pronóstico para Tepuxtepec, Michoacán, con la herramienta WRF

3.1. Elección del sitio Tepuxtepec, Michoacán

De acuerdo al Atlas Nacional de Zonas con Alto Potencial de Energías Limpias (figura 3.1 y figura 3.2) desarrollado por la Secretaria de Energía del Gobierno de México, podemos observar que el Estado de Michoacán no se encuentra incluido dentro de las zonas con alto potencial de generación de energía eólica.

Sin embargo, de acuerdo dos investigaciones: “Evaluación del recurso eólico en el Estado de Michoacán: identificación preliminar por Gilberto Suárez Camargo (2014) y “Emplazamiento eólico incorporado a la red eléctrica en el Estado de Michoacán” por Julio Cesar Castañeda Ramírez (2018), muestran que existe una zona en el Estado de Michoacán cuya evaluación del recurso eólico es lo suficientemente grande para la generación de energía eólica.

En la investigación publicada por Gilberto Suárez Camargo (2014) “Evaluación del re-

CAPÍTULO 3. DESARROLLO DEL MODELO DE PRONÓSTICO PARA TEPUXTEPEC, MICHOACÁN, CON LA HERRAMIENTA WRF



Figura 3.1: Zonas con alto potencial de energía eólica. Tomado del “Atlas Nacional de Zonas con Alto Potencial de Energías Limpias”, 2018. Secretaria de Energía del Gobierno de México.

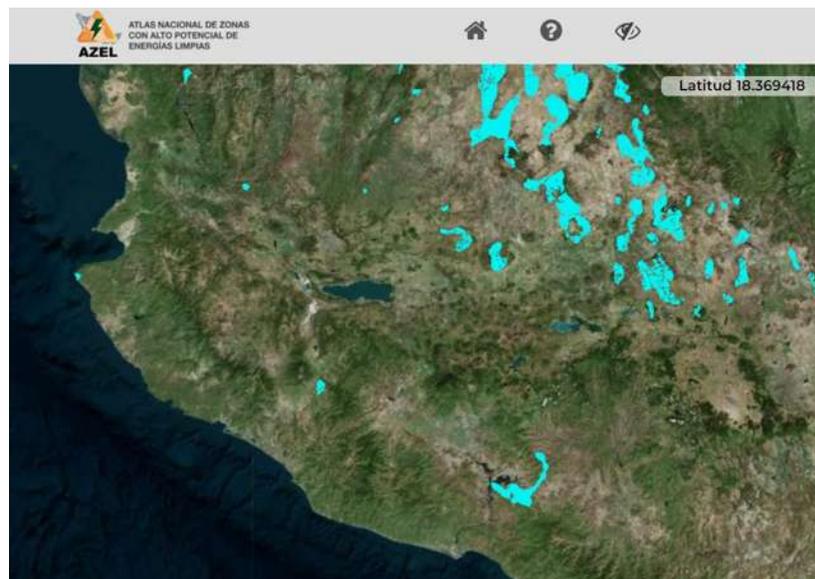


Figura 3.2: Zonas con alto potencial de energía eólica en la región de Michoacán. Tomado del “Atlas Nacional de Zonas con Alto Potencial de Energías Limpias”, 2018. Secretaria de Energía del Gobierno de México.

CAPÍTULO 3. DESARROLLO DEL MODELO DE PRONÓSTICO PARA TEPUXTEPEC, MICHOACÁN, CON LA HERRAMIENTA WRF

curso eólico en el Estado de Michoacán: identificación preliminar” se analiza el recurso eólico de 40 estaciones meteorológicas cuya ubicación de acuerdo al Sistema Meteorológico Nacional (SMN) se ubican en Michoacán. Esta investigación concluye que existen zonas con una considerable cantidad de recurso eólico, como la estación Tepuxtepec perteneciente al municipio de Contepec, Michoacán, que presenta velocidades promedio de 6.2 m/s; también la estación Laguna de Fresno perteneciente al municipio de Maravatío, Michoacán, con velocidades promedio de 5.33 m/s; otras zonas interesantes se encuentran en la estación Isla Clarión y la estación Isla Socorro que presentan velocidades promedio de 7 m/s y 5.4 m/s, respectivamente, aunque estas últimas dos estaciones administrativamente pertenecen al estado de Colima. (Suarez, 2014)

Posteriormente, en la investigación publicada por Julio Cesar Castañeda Ramírez (2018) “Emplazamiento eólico incorporado a la red eléctrica en el Estado de Michoacán” se hace un análisis más concreto, concluyendo que la zona de Tepuxtepec, Michoacán, es la región que presenta mayor recurso eólico en Michoacán, con una velocidad promedio anual de 5.7 m/s, generando una producción energética de 26,544.3 Megawatts-hora al año, suficiente para una generación comercial. (Castañeda, 2018)

3.1.1. Mapas anuales de la velocidad del viento del Estado de Michoacán

De la plataforma Geospatial Interactive Online Visualization And Analysis Infrastructure (GIOVANNI) creada por el Goddard Earth Sciences Data and Information Services

CAPÍTULO 3. DESARROLLO DEL MODELO DE PRONÓSTICO PARA TEPUXTEPEC, MICHOACÁN, CON LA HERRAMIENTA WRF

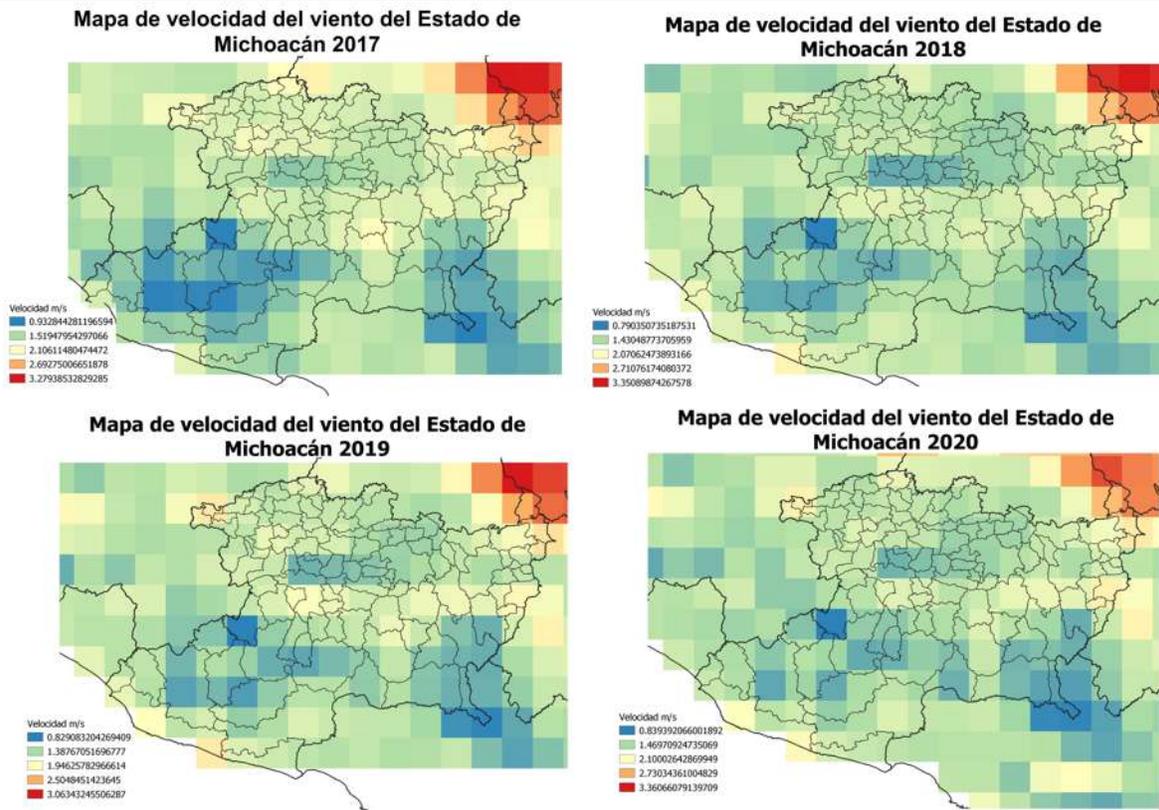


Figura 3.3: Mapas de la velocidad promedio anual del viento para la región de Michoacán 2017 (arriba izquierda), 2018 (arriba derecha), 2019 (abajo izquierda) y 2020 (abajo derecha)

Center (GES DISC) de la Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio de Estados Unidos (NASA) se obtuvo archivos ráster con extensión .nc que contienen las velocidades del viento promedio anual de la región que incluye al Estado de Michoacán para los años 2017, 2018, 2019, 2020. Se utilizó el software Qgis para editar los archivos ráster, agregar la división política del estado y los municipios y crear los mapas que se muestran en la Figura 3.3.

El objetivo de estos mapas es simplemente comparar la velocidad del viento en las diferentes zonas del Estado de Michoacán, de acuerdo a la resolución dada por GIO-

VANNI que es de 0.25 grados, aproximadamente 28 kilómetros. Se puede observar que las mayores velocidades del viento, y por lo tanto la mayor cantidad de recurso eólico, se encuentra al noreste del estado, en los municipios de Contepec y Epitacio Huerta, zona donde se localiza Tepuxtepec, lo cual es concordante con las dos investigaciones mencionadas anteriormente que muestran que la región de Tepuxtepec es la que cuenta con mayor recurso eólico. En consecuencia, el lugar seleccionado para la generación del modelo de pronóstico.

3.2. Desarrollo del modelo de pronóstico con WRF

3.2.1. Máquina Virtual

El primer desafío al que se enfrentó al desarrollar el modelo de pronóstico se derivó de las consecuencias logísticas provocadas por la pandemia. En la Facultad se cuenta con un servidor cuyo único propósito es albergar a la herramienta WRF con la finalidad de desarrollar el modelo de pronóstico. Pero debido a las medidas sanitarias por parte de la Universidad no fue posible trabajar directamente en el servidor, así que se optó por trabajar vía remota, es decir, conectarse mediante PuTTY¹ al servidor. Pero aquí surgió otro problema, ya que al trabajar fuera de la red universitaria, la Universidad limita el tráfico de datos que fluyen de manera externa a la red, lo que provocó que constantemente se perdiera la conexión al servidor.

La solución para este problema fue utilizar una máquina virtual *Oracle VirtualBox* (fi-

¹PuTTY es un cliente SSH y Telnet con el que podemos conectarnos a servidores remotos iniciando una sesión en ellos que nos permite ejecutar comandos. <https://www.putty.org/>

CAPÍTULO 3. DESARROLLO DEL MODELO DE PRONÓSTICO PARA TEPUXTEPEC, MICHOACÁN, CON LA HERRAMIENTA WRF

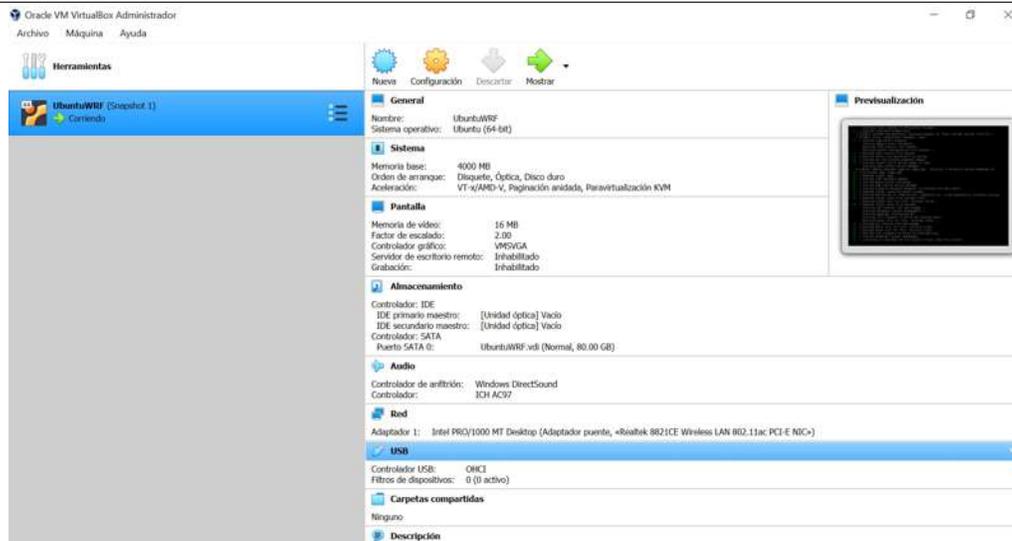


Figura 3.4: Captura de pantalla de la Máquina Virtual que contiene a WRF

gura 3.4) para crear una copia del contenido del servidor, es decir, una copia de la herramienta WRF, y poder trabajar a distancia sin tener que depender de la conexión al servidor. El gran inconveniente de trabajar de este modo es que se depende totalmente de la capacidad y procesamiento de la computadora en la que se alberga la máquina virtual, por lo tanto, si se desea trabajar de esta manera es recomendable utilizar una computadora con al menos 16GB de memoria RAM.

3.2.2. Datos de Reanálisis

Como se mencionó en los capítulos anteriores, todos lo modelo numéricos de predicción del clima necesitan de datos iniciales para realizar su pronóstico. Estos datos pueden venir de diferentes fuentes, en esta ocasión se decidió utilizar una de las bases de datos provistas por *The Research Data Archive*² administrada por National Center for At-

²<https://rda.ucar.edu/>

CAPÍTULO 3. DESARROLLO DEL MODELO DE PRONÓSTICO PARA TEPUXTEPEC, MICHOACÁN, CON LA HERRAMIENTA WRF

atmospheric Research (NCAR). Es importante señalar que para poder tener acceso a sus bases de datos es necesario registrarse en su pagina, y esperar a que la solicitud sea aprobada.

Existe una gran cantidad de bases de datos. La seleccionada para el presente modelo es la base de datos *NCEP Climate Forecast System Version 2 (CFSv2) 6-hourly Products* (figura 3.5). La razón por la cual se escogió es porque, al probar con diferentes bases de datos, ésta es la que menos errores provocó al momento de la compilación de WRF y la que menor tamaño tenían sus archivos. La desventaja de utilizar esta base de datos es que hay que descargar 3 diferentes tipos de datos para una misma hora *Pressure levels, Surface y SST* como se muestra en la figura 3.5. Existe una desventaja adicional de esta base de datos cuando se ejecuta WPS, pero eso se explicará en la próxima sección.

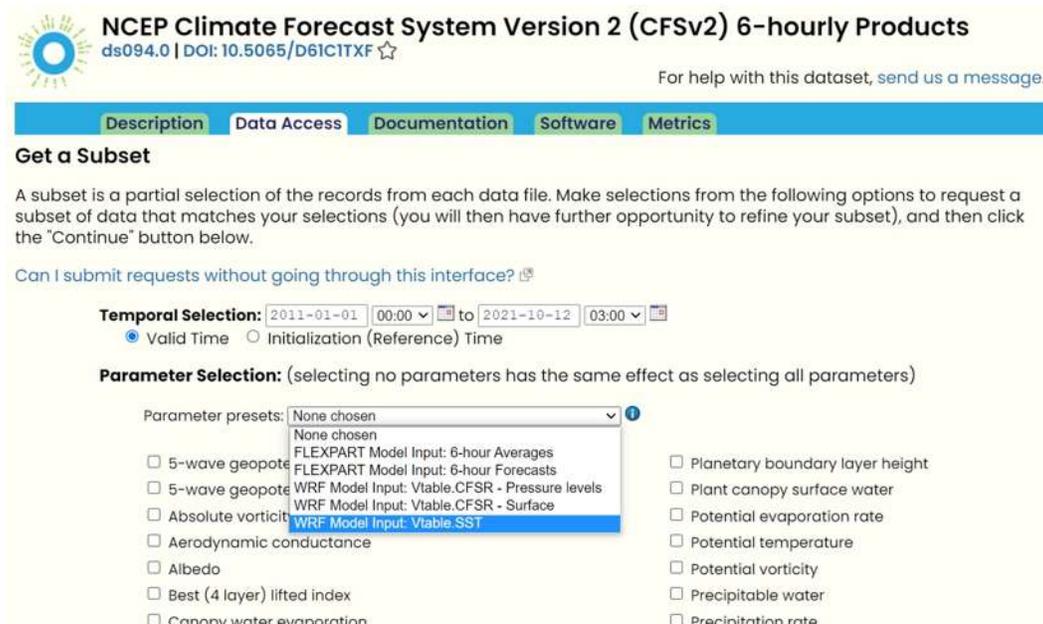


Figura 3.5: Base de datos de reanálisis *NCEP Climate Forecast System Version 2 (CFSv2)* utilizada para desarrollar el modelo de pronóstico.

CAPÍTULO 3. DESARROLLO DEL MODELO DE PRONÓSTICO PARA TEPUXTEPEC, MICHOACÁN, CON LA HERRAMIENTA WRF

Se seleccionaron tres fechas diferentes:

1. Del 1 al 5 de febrero de 2017
2. Del 1 al 5 de abril de 2021
3. Del 1 al 10 de noviembre de 2020

Fechas que coinciden con datos reales observados obtenidos de diferentes estaciones meteorológicas que servirán para posteriormente hacer la validación del modelo.

A partir de aquí se utilizará la primera fecha (1 al 5 de febrero de 2017) como ejemplo para explicar el modelo.

La base de datos escogida tiene un intervalo de 6 horas, entonces por cada día tendremos 4 archivos, como el periodo abarca 5 días, en teoría deberían de ser en total 21 archivos, pero ya que se deben descargar tres diferentes tipos de datos, en total se tienen 21 archivos para *Pressure levels*, 42 archivos (ya que estos son dobles) para *Surface* y 21 archivos para *SST*, lo que nos dan un total de 84 archivos para 5 días. Puede parecer excesivo si comparamos con otras bases de datos en las sólo es necesario descargar 21 archivos, pero si se ve desde otro punto de vista, varios de los 84 archivos son de un tamaño realmente pequeño, de sólo algunos megabytes, lo que facilita su uso en comparación con otras bases de datos con archivos de hasta incluso medio Gigabyte.

Para descargar estos datos iniciales o de reanálisis se puede de hacer de dos formas: La primera es descargarlos desde la pagina-servidor de *The Research Data Archive* directamente hasta la maquina virtual, lo cual depende de la conexión a Internet del equipo, lo que puede provocar, si se tiene una mala conexión, que se descarguen archivos inconclu-

CAPÍTULO 3. DESARROLLO DEL MODELO DE PRONÓSTICO PARA TEPUXTEPEC, MICHOACÁN, CON LA HERRAMIENTA WRF

tos e incluso vacíos. Para evitar lo anterior, es aconsejable hacerlo de manera manual, es decir, descargar uno por uno los archivos a la computadora, y desde la computadora copiarlos a la maquina virtual con ayuda del software *WinSCP*³ como se muestra en la figura 3.6.

Es aconsejable tener los datos divididos en tres carpetas (PRESS, SURF y SST) para

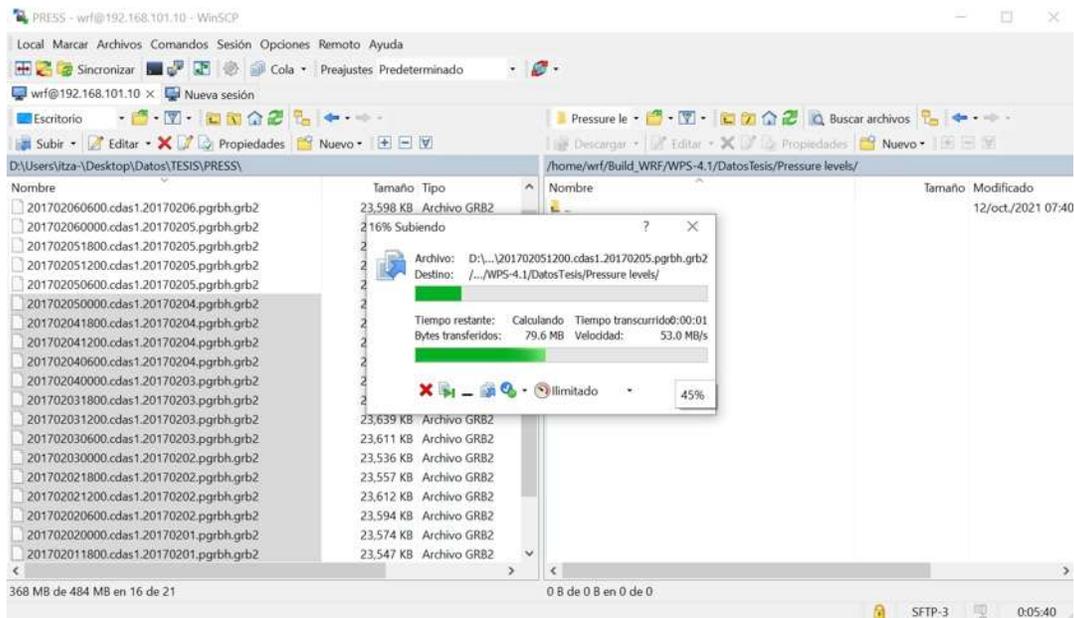


Figura 3.6: Traslado de los datos de re-análisis desde la computadora a la maquina virtual con el software *WinSCP*

facilitar los siguientes procesos.

3.2.3. Sistema de Pre-procesamiento o WPS (WRF Preprocessing System)

A pesar de que la maquina virtual, en teoría, está contenida en nuestra computadora, ésta se maneja como un ente externo, por lo tanto, para trabajar con la maquina virtual

³WinSCP es una aplicación cuya función principal es facilitar la transferencia segura de archivos entre dos sistemas informáticos local y remoto con servicio SSH. <https://winscp.net/>

CAPÍTULO 3. DESARROLLO DEL MODELO DE PRONÓSTICO PARA TEPUXTEPEC, MICHOACÁN, CON LA HERRAMIENTA WRF



Figura 3.7: Uso de la maquina virtual con la ayuda de PuTTY.

se necesita hacerlo como si se estuviera conectándose a un servidor externo. Eso se hace mediante el software PuTTY⁴. En la figura 3.7 se muestra una captura de pantalla de una terminal de PuTTY. Notése que WRF no posee una interfaz gráfica, así que todo su proceso se hace mediante líneas de comandos.

En el capítulo anterior se describió las características de WPS que consiste de tres programas: *geogrid.exe*, *ungrib.exe* y *metgrid.exe*, cuya función colectiva es hacer los preparativos necesarios para la ejecución del programa *real.exe* para la simulación de datos reales. Su ejecución esta dirigida con un archivo de texto llamado *namelist.wps* que contiene lo siguiente:

```
&share
wrf_core = 'ARW',
max_dom = 1,
start_date = '2017-02-01_00:00:00',
end_date   = '2017-02-06_00:00:00',
interval_seconds = 21600
io_form_geogrid = 2,
/

&geogrid
```

⁴PuTTY es un cliente SSH y Telnet con el que podemos conectarnos a servidores remotos iniciando una sesión en ellos que nos permite ejecutar comandos <https://www.putty.org/>

CAPÍTULO 3. DESARROLLO DEL MODELO DE PRONÓSTICO PARA TEPUXTEPEC, MICHOACÁN, CON LA HERRAMIENTA WRF

```
parent_id      = 1,
parent_grid_ratio = 1,
i_parent_start = 1,
j_parent_start = 1,
e_we          = 110,
e_sn          = 88,
geog_data_res = 'default',
dx = 30000,
dy = 30000,
map_proj      = 'lambert',
ref_lat      = 19.0,
ref_lon      = -101.5,
truelat1     = 15.0,
truelat2     = 30.0,
stand_lon    = -101.5,
geog_data_path = '../WPS_GEOG/'
/

&ungrib
  out_format = 'WPS',
  prefix     = 'PRESS',
/

&metgrid
  fg_name = 'PRESS','SURF','SST',
  io_form_metgrid = 2,
/
```

En la primera sección de la *namelist.wps* se establece las fechas de los datos iniciales, que van desde el 1 de febrero de 2017 a las 00 horas hasta el 6 de febrero de 2017 a las 00 horas correspondientes a la primera fecha. Como el intervalo entre cada archivo de reanálisis es de 6 horas, lo que es igual a 21600 segundos, ésto se coloca en `interval_seconds = 21600`.

```
&share
  wrf_core = 'ARW',
  max_dom = 1,
  start_date = '2017-02-01_00:00:00',
  end_date   = '2017-02-06_00:00:00',
  interval_seconds = 21600
  io_form_geogrid = 2,
```

La siguiente sección da las instrucciones para la ejecución de *geogrid.exe* donde se es-

CAPÍTULO 3. DESARROLLO DEL MODELO DE PRONÓSTICO PARA TEPUXTEPEC, MICHOACÁN, CON LA HERRAMIENTA WRF

tablece el tamaño y resolución de la malla (*e_we*, *e_sn*, *dx*, *dy*), las coordenadas del punto medio de la malla (*ref_lat*, *ref_lon*) y la proyección cartográfica más conveniente (*map_proj*, *truelat1*, *truelat2*).

```
&geogrid
parent_id           = 1,
parent_grid_ratio   = 1,
i_parent_start      = 1,
j_parent_start      = 1,
e_we                = 110,
e_sn                = 88,
geog_data_res       = 'default',
dx                  = 30000,
dy                  = 30000,
map_proj            = 'lambert',
ref_lat             = 19.0,
ref_lon             = -101.5,
truelat1            = 15.0,
truelat2            = 30.0,
stand_lon           = -101.5,
geog_data_path      = '../WPS_GEOG/'
```

Guardamos lo cambios y ejecutamos *geogrid.exe* para obtener un archivo llamado *geo_em.d01.nc*.

La siguiente sección le pertenece a *ungrib.exe*. Recordemos que ungrid se encarga de leer los archivos iniciales, extraerle la información que se necesita y reescribirla en un formato intermedio más simple cuyo nombre es a libre elección. Los datos iniciales se ha dividido en tres carpetas, la primera llamada PRESS para los archivos de *Pressure levels*, la segunda llamada SURF para los datos de *Surface* y la ultima llamada SST para los archivos *SST*.

Como se mencionó en el capitulo anterior, cada base de datos cuenta con su propia tabla de conversiones o *Vtable* que hay que especificar. En este caso le corresponde la tabla *Vtable.CFSR* que se selecciona con el comando:

CAPÍTULO 3. DESARROLLO DEL MODELO DE PRONÓSTICO PARA TEPUXTEPEC, MICHOACÁN, CON LA HERRAMIENTA WRF

```
ln -sf ./ungrid/Variable\_Tables/vtable.CFSR Vtable
```

Es importante mostrarle al programa la ruta de los archivos de análisis, proceso conocido como enlazar, gracias al comando

```
./link\_grib.csh /home/wrf/WPS/PRESS\
```

En la *namelist.wps* escogemos el nombre de los archivos intermedios que obtendremos después de ejecutar `ungrib`, por ejemplo `prefix = 'PRESS'` para recordar que son archivos de *Pressure levels* contenidos en la carpeta PRESS.

```
&ungrib  
  out_format = 'WPS',  
  prefix = 'PRESS',
```

Ejecutamos *ungrib.exe* y obtenemos 21 archivos llamados `PRESS:2017-02-01_00`.

Importante, hasta aquí sólo se han extraído los archivos de la PRIMERA CARPETA, recordemos que son tres carpetas en total.

Para la segunda carpeta volvemos a enlazar los archivos de reanálisis pero ahora a la segunda carpeta llamada SURF con el comando:

```
./link\_grib.csh /home/wrf/WPS/SURF\
```

Modificamos también la *namelist.wps* escogiendo SURF como nombre para los archivos intermedios para recordar que son archivos de *Surface* contenidos en la carpeta SURF.

```
&ungrib  
  out_format = 'WPS',  
  prefix = 'SURF',
```

Ejecutamos nuevamente *ungrib.exe* y obtenemos 21 archivos llamados `SURF:2017-02-01_00`.

CAPÍTULO 3. DESARROLLO DEL MODELO DE PRONÓSTICO PARA TEPUXTEPEC, MICHOACÁN, CON LA HERRAMIENTA WRF

Para la tercera carpeta SST volvemos a repetir el proceso anterior, pero nombrando a los archivos intermedios como SST.

```
&ungrib
  out_format = 'WPS',
  prefix = 'SST',
```

Se vuelve a ejecutar *ungrib.exe* por tercera vez para obtener 21 archivos llamados SST:2017-02-01_00.

Al final se tienen 63 archivos de nombre PRESS, SURF y SST.

El tener que realizar este proceso tres veces es uno de los grandes inconvenientes de usar la base de datos *NCEP Climate Forecast System Version 2 (CFSv2) 6-hourly Products*, pero vale la pena sin con ello se evitan errores y se optimiza el espacio.

La ultima sección de la *namelist.wps* le pertenece a metgrid, cuya función es interpolar horizontalmente la información meteorológica contenida en los 63 archivos PRESS, SURF y SST que fue extraída por ungrid y colocarla en el dominio *geo_em.d01.nc* definido por geogrid.

```
&metgrid
  fg_name = 'PRESS', 'SURF', 'SST',
  io_form_metgrid = 2,
/
```

Ejecutamos *metgrid.exe* y obtenemos 21 archivos de nombre

met_em.d01.2017-02-01_00:00:00.nc. Estos archivos son los necesarios y fundamentales para realizar el modelo de pronóstico.

3.2.4. Integrador Numérico WRF-ARW (Advanced Research WRF)

Una vez que se ha concluido los tres procesos que integran WPS y se han obtenido los archivos con nombre `met_em.d01`, es necesario copiar estos archivos al carpeta `run` de WRF con el comando

```
cp met_em* /home/wrf/WRF/run/
```

WRF-ARW consiste de dos programas: un programa de inicialización llamado `real.exe` y el programa de integración numérica `wrf.exe`. WRF usa los esquemas de integración numérica Runge-Kutta de 2do y 3er orden para integrar cada uno de los puntos de la malla en que se ha dividido la atmósfera. Las ecuaciones que utiliza se han mostrado anteriormente en la sección 2.3.

Al igual que WPS, WRF posee un archivo de texto llamado `namelist.input` que controla la ejecución del integrador-solucionador WRF.

```
&time_control
run_days           = 5,
run_hours          = 00,
run_minutes        = 0,
run_seconds        = 0,
start_year         = 2017,
start_month        = 02,
start_day          = 01,
start_hour         = 00,
end_year           = 2017,
end_month          = 02,
end_day            = 06,
end_hour           = 00,
interval_seconds   = 21600
input_from_file    = .true.,
history_interval   = 60,
frames_per_outfile = 24,
restart            = .false.,
restart_interval   = 7200,
```

CAPÍTULO 3. DESARROLLO DEL MODELO DE PRONÓSTICO PARA TEPUXTEPEC, MICHOACÁN, CON LA HERRAMIENTA WRF

```
io_form_history           = 2
io_form_restart          = 2
io_form_input            = 2
io_form_boundary         = 2
/

&domains
time_step                = 60,
time_step_fract_num      = 0,
time_step_fract_den      = 1,
max_dom                  = 1,
e_we                     = 110,
e_sn                     = 88,
e_vert                   = 30,
p_top_requested          = 10000,
num_metgrid_levels       = 38,
num_metgrid_soil_levels  = 4,
dx                       = 30000,
dy                       = 30000,
grid_id                  = 1,
parent_id                = 0,
i_parent_start           = 1,
j_parent_start           = 1,
parent_grid_ratio        = 1,
parent_time_step_ratio   = 1,
feedback                 = 1,
smooth_option            = 0
/

&physics
mp_physics                = 6,
cu_physics                = 1,
ra_lw_physics            = 4,
ra_sw_physics            = 4,
bl_pbl_physics           = 6,
sf_sfclay_physics       = 2,
sf_surface_physics      = 2,
radt                     = 30,
bldt                     = 0,
cudt                     = 5,
icloud                   = 1,
isfflx                   = 1,
ifsnow                   = 1,
surface_input_source     = 3,
num_land_cat             = 21,
sf_urban_physics        = 0,
bl_mynn_tkebudget        = 1,
slope_rad                = 1,
topo_shading             = 1,
shadlen                  = 25000,
prec_acc_dt              = 15,
topo_wind                = 1,
```

CAPÍTULO 3. DESARROLLO DEL MODELO DE PRONÓSTICO PARA TEPUXTEPEC, MICHOACÁN, CON LA HERRAMIENTA WRF

```
/
&dynamics
rk_ord                = 3,
w_damping             = 0,
diff_opt              = 1,
km_opt                = 4,
diff_6th_opt          = 0,
diff_6th_factor       = 0.12,
base_temp              = 290.
damp_opt               = 3,
zdamp                 = 5000.,
dampcoef              = 0.2,
khdif                 = 0,
kvdif                 = 0,
non_hydrostatic       = .true.,
moist_adv_opt         = 1,
scalar_adv_opt        = 1,
gwd_opt               = 1,
/

&bdy_control
spec_bdy_width        = 5,
specified              = .true.
/

&grib2
/

&namelist_quilt
nio_tasks_per_group = 0,
nio_groups           = 1,
/
```

La primera sección de la *namelist.input* corresponde a la duración del pronóstico, en este caso de 5 días (`run_days = 5`), las fechas del pronóstico (`start_year`, `start_month`, `start_day`, `start_hour`, `end_year`, `end_month`, `end_day`, `end_hour`), el intervalo de los archivos `met` que es de 6 horas, es decir, 21600 segundos (`interval_seconds = 21600`), el intervalo de los archivos de salida después de que WRF ha realizado la integración, que se ha escogido de 1 hora = 60 minutos (`history_interval = 60`) y la cantidad de datos pronosticados que contendrá cada archivo de salida (`frames_per_outfile =`

CAPÍTULO 3. DESARROLLO DEL MODELO DE PRONÓSTICO PARA TEPUXTEPEC, MICHOACÁN, CON LA HERRAMIENTA WRF

24), que se ha escogido sean 24 para que cada archivo contenga 24 horas, es decir, 1 día de pronóstico, y al final obtener 5 archivos de salida por los 5 días de pronóstico.

```
&time_control
run_days              = 5,
run_hours             = 00,
run_minutes           = 0,
run_seconds           = 0,
start_year            = 2017,
start_month           = 02,
start_day             = 01,
start_hour            = 00,
end_year              = 2017,
end_month             = 02,
end_day               = 06,
end_hour              = 00,
interval_seconds      = 21600
input_from_file       = .true.,
history_interval      = 60,
frames_per_outfile    = 24,
restart               = .false.,
restart_interval      = 7200,
io_form_history       = 2
io_form_restart       = 2
io_form_input         = 2
io_form_boundary      = 2
/
```

La segunda sección de la *namelist.input* comparte ajustes con la *namelist.wps* del proceso WPS (*e_we*, *e_sn*, *dx*, *dy*), el parámetro *num_metgrid_levels* dependerá de la base de datos de re-análisis usada y el parámetro *time_step* corresponde al intervalo de los archivos de salida de 1 hora = 60 minutos.

```
&domains
time_step             = 60,
time_step_fract_num   = 0,
time_step_fract_den   = 1,
max_dom               = 1,
e_we                  = 110,
e_sn                   = 88,
e_vert                = 30,
p_top_requested       = 10000,
num_metgrid_levels    = 38,
num_metgrid_soil_levels = 4,
dx                     = 30000,
dy                     = 30000,
```

CAPÍTULO 3. DESARROLLO DEL MODELO DE PRONÓSTICO PARA TEPUXTEPEC, MICHOACÁN, CON LA HERRAMIENTA WRF

```
grid_id                = 1,
parent_id              = 0,
i_parent_start        = 1,
j_parent_start        = 1,
parent_grid_ratio      = 1,
parent_time_step_ratio = 1,
feedback              = 1,
smooth_option         = 0
/
```

La siguiente sección es de las más importantes para obtener un buen pronóstico ya que corresponde a los parámetros físicos o física del modelo. De acuerdo a la zona geografía del pronóstico existen varias propuestas publicadas.

Para mallas de 1 a 3 km de resolución y pronósticos de 1 a 3 días en regiones de Estados

Unidos se tiene:

```
mp_physics            = 8,
ra_lw_physics        = 4,
ra_sw_physics        = 4,
radt                 = 10,
sf_sfclay_physics    = 2,
sf_surface_physics   = 2,
bl_pbl_physics       = 2,
bldt                 = 0,
cu_physics           = 0,
ptop_requested       = 5000,
e_vert               = 40,
```

Para mallas de 10 a 20 km de distancia en pronósticos de 1 a 3 días en los Estados

Unidos:

```
mp_physics            = 8,
ra_lw_physics        = 4,
ra_sw_physics        = 4,
radt                 = 15,
sf_sfclay_physics    = 1,
sf_surface_physics   = 2,
bl_pbl_physics       = 1,
bldt                 = 0,
cu_physics           = 3,
cudt                 = 0,
ptop_requested       = 5000,
e_vert               = 39,
```

CAPÍTULO 3. DESARROLLO DEL MODELO DE PRONÓSTICO PARA TEPUXTEPEC, MICHOACÁN, CON LA HERRAMIENTA WRF

Para regiones frías de mallas de 10 a 30 km de tamaño (zona antártica):

mp_physics	= 4,
ra_lw_physics	= 4,
ra_sw_physics	= 2,
radt	= 15,
sf_sfclay_physics	= 2,
sf_surface_physics	= 2,
bl_pbl_physics	= 2,
bldt	= 0,
cu_physics	= 1,
cutd	= 5,
fractional_seaice	= 1,
seaice_threshold	= 0.0,
ptop_requested	= 1000,
e_vert	= 44,

Para huracanes:

mp_physics	= 6,
ra_lw_physics	= 4,
ra_sw_physics	= 4,
radt	= 10,
sf_sfclay_physics	= 1,
sf_surface_physics	= 2,
bl_pbl_physics	= 1,
bldt	= 0,
cu_physics	= 6,
cutd	= 0,
isftcflx	= 2,
ptop_requested	= 2000,
e_vert	= 36,

Para climas regionales con mallas de 10 a 30 km de tamaño:

mp_physics	= 6,
ra_lw_physics	= 3,
ra_sw_physics	= 3,
radt	= 30,
sf_sfclay_physics	= 1,
sf_surface_physics	= 2,
bl_pbl_physics	= 1,
bldt	= 0,
cu_physics	= 1,
cutd	= 5,
sst_update	= 1,
tmn_update	= 1,
sst_skin	= 1,
bucket_mm	= 100.0,
bucket_J	= 1.e9,
ptop_requested	= 1000,

CAPÍTULO 3. DESARROLLO DEL MODELO DE PRONÓSTICO PARA TEPUXTEPEC, MICHOACÁN, CON LA HERRAMIENTA WRF

```
e_vert           = 51,  
spec_bdy_width  = 10,  
spec_zone       = 1,  
relax_zone      = 9,  
spec_exp        = 0.33,
```

Las parámetros utilizados para el presente modelo de pronóstico son los siguientes:

```
&physics  
mp_physics      = 6,  
cu_physics      = 1,  
ra_lw_physics   = 4,  
ra_sw_physics   = 4,  
bl_pbl_physics  = 6,  
sf_sfclay_physics = 2,  
sf_surface_physics = 2,  
radt           = 30,  
bldt           = 0,  
cudt           = 5,  
icloud         = 1,  
isfflx        = 1,  
ifsnow        = 1,  
surface_input_source = 3,  
num_land_cat   = 21,  
sf_urban_physics = 0,  
bl_mynn_tkebudget = 1,  
slope_rad      = 1,  
topo_shading   = 1,  
shadlen        = 25000,  
prec_acc_dt    = 15,  
topo_wind      = 1,
```

Estos parámetros han dado buenos resultados para pronósticos de la zona de Tepuxtepec, Michoacan.

La ultima sección `&dynamics` corresponde a ajustes del proceso de integración del modelo.

Por ejemplo `rk_ord` para definir el esquema de integración Runge-Kutta de 2do o 3er orden, si el modelo es hidroestático o no hidroestático (`non-hydrostatic`), así como características de la difusión.

```
&dynamics  
rk_ord          = 3,  
w_damping       = 0,  
diff_opt        = 1,
```

CAPÍTULO 3. DESARROLLO DEL MODELO DE PRONÓSTICO PARA TEPUXTEPEC, MICHOACÁN, CON LA HERRAMIENTA WRF

```
km_opt           = 4,
diff_6th_opt     = 0,
diff_6th_factor  = 0.12,
base_temp        = 290.
damp_opt         = 3,
zdamp            = 5000.,
dampcoef         = 0.2,
khdif            = 0,
kvdif            = 0,
non_hydrostatic  = .true.,
moist_adv_opt    = 1,
scalar_adv_opt   = 1,
gwd_opt          = 1,
/
```

Una vez que se han hecho los ajustes necesarios en la *namelist.input*, el siguiente paso es correr el programa *real.exe* diseñado para casos reales que establece la inicialización del modelo y las condiciones de frontera, dando como resultado dos archivos *wrfinput_d01* y *wrfbdy_d01*.

Llegado este punto, finalmente se tiene todo lo necesario para realizar la integración numérica que generará el pronóstico. Eso se logra con el comando:

```
./wrf.exe
```

Este es el proceso fundamental del modelo de pronóstico, razón por la cual es el que más tiempo involucra por la complejidad de los cálculos numéricos. El tiempo que tarde en completarse esta tarea depende de la cantidad de días a pronosticar y los recursos computacionales del equipo con los que WRF este trabajando. Entre una mejor procesador se utilice las tareas se realizarán más rápido.

Para sacar mayor provecho de los recursos computacionales del equipo, y realizar más rápido el computo, se puede utilizar el siguiente comando, que por supuesto depende del numero de procesadores disponibles en el equipo.

CAPÍTULO 3. DESARROLLO DEL MODELO DE PRONÓSTICO PARA TEPUXTEPEC, MICHOACÁN, CON LA HERRAMIENTA WRF

```
mpirun -np 4 ./wrf.exe
```

Al finalizar *wrf.exe* finalmente obtenemos los archivos de salida que contienen los datos pronosticados. En nuestros ajustes indicamos que queríamos 5 archivos así que obtendremos 5 archivos `wrfout` para los 5 días pronosticados, donde cada archivo contiene 24 horas de pronóstico.

```
wrfout_d01_2017-02-01_00-00-00  
wrfout_d01_2017-02-02_00-00-00  
wrfout_d01_2017-02-03_00-00-00  
wrfout_d01_2017-02-04_00-00-00  
wrfout_d01_2017-02-05_00-00-00
```

Para ver la lista de variables y tiempos contenidos en cada archivo usamos el comando

```
ncdump -v Times wrfout_d01_2017-02-01_00-00-00
```

Existen diferentes herramientas para el post-procesamiento y visualización de los archivos `wrfout` las cuales se han mencionado en la sección 2.4. En la siguiente sección se mostrará las herramientas que se utilizaron para el presente modelo de pronóstico.

3.3. Post-procesamiento

Existen varias herramientas desarrolladas para procesar los archivos `wrfout`, la mayoría de ellas creadas externamente a WRF, en la sección 2.4 se muestra una lista de las principales. Para el presente modelo de pronóstico se decidió por GrADS (Figura 3.8), ya que era la herramienta que mejor se ajustaba para los propósitos de los datos de pronóstico.

GrADS (The Grid Analysis and Display System) es una herramienta creada para facilitar el acceso, manipulación y visualización de datos climatológicos terrestres. (Grid Analysis and Display System, s.f.)

CAPÍTULO 3. DESARROLLO DEL MODELO DE PRONÓSTICO PARA TEPUXTEPEC, MICHOACÁN, CON LA HERRAMIENTA WRF

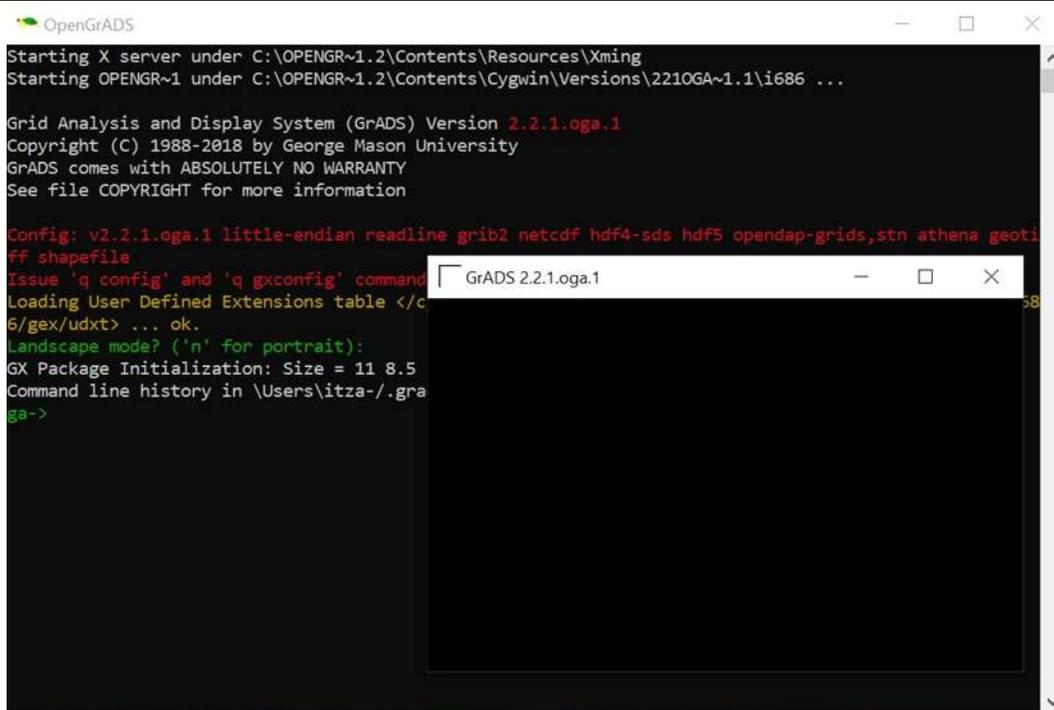


Figura 3.8: Captura de pantalla del software GrADS

Se exploró utilizar otras herramientas de posprocesamiento como Ncview⁵ pero lamentablemente solo está disponible para sistemas operativos como Linux y no se encuentra disponible para Windows.

La desventaja de GrADS es que a diferencia de otras herramientas de post-procesamiento que pueden leer directamente los archivos `wrfout`, GrADS necesita que los archivos se sometan a un proceso extra llamado ARWpost⁶, el cuál puede instalarse en la maquina virtual sin problemas.

Una vez que se ha instalado ARWPost en la maquina virtual, al explotar la carpeta que lo contiene podemos observar un archivo de texto llamado `namelist.ARWpost`, similar a los archivos de texto para los procesos WPS y WRF hechos anteriormente. Este docu-

⁵http://meteora.ucsd.edu/~pierce/ncview_home_page.html

⁶<https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/graphics/ARWpost/ARWpost.htm>

CAPÍTULO 3. DESARROLLO DEL MODELO DE PRONÓSTICO PARA TEPUXTEPEC, MICHOACÁN, CON LA HERRAMIENTA WRF

mento *namelist.ARWpost* sirve para indicarle al programa que archivos son los que tiene que someter al proceso y que características deben de tener.

```
&datetime
  start_date = '2017-02-01_00:00:00',
  end_date   = '2017-02-06_00:00:00',
  interval_seconds = 3600,
  tacc = 0,
  debug_level = 0,
/

&io
  input_root_name = './wrfout_d01_2017-02*'
  output_root_name = './Pronostico2017'
  plot = 'all_list'
  fields = 'height,pressure,tk,tc'
  mercator_defs = .true.
/

  split_output = .true.
  frames_per_outfile = 2

  plot = 'all'
  plot = 'list'
  plot = 'all_list'
! Below is a list of all available diagnostics
  fields = 'height,geopt,theta,tc,tk,td,td2,rh,rh2,umet,vmet,pressure,
  u10m,v10m,wdir,wspd,wd10,ws10,slp,mcape,mcin,lcl,lf,cape,cin,dbz,
  max_dbz,clfr'

&interp
  interp_method = 0,
  interp_levels = 1000.,950.,900.,850.,800.,750.,700.,650.,600.,550.,
  500.,450., 400.,350.,300.,250.,200.,150.,100.,
/
  extrapolate = .true.

  interp_method = 0,      ! 0 is model levels, -1 is nice height levels,
  1 is user specified pressure/height

  interp_levels = 1000.,950.,900.,850.,800.,750.,700.,650.,600.,550.,
  500.,450.,400.,350.,300.,250.,200.,150.,100.,
  interp_levels = 0.25, 0.50, 0.75, 1.00, 2.00, 3.00, 4.00, 5.00, 6.00,
  7.00, 8.00, 9.00, 10.0, 11.0, 12.0, 13.0, 14.0, 15.0, 16.0, 17.0,
  18.0, 19.0, 20.0,
```

Con los comandos *start_date* y *end_date* se establece las fechas del pronóstico que contienen los archivos *wrfout*, así como el intervalo de los mismos que recordamos es de

CAPÍTULO 3. DESARROLLO DEL MODELO DE PRONÓSTICO PARA TEPUXTEPEC, MICHOACÁN, CON LA HERRAMIENTA WRF

1 hora en el ejemplo (`interval_seconds = 3600`).

El comando `input_root_name` le indica al programa la ruta de almacenamiento de los archivos `wrfout`, el asterisco en `wrfout_d01.2017-02*` le indica al programa que debe incluir todos los archivos cuyos nombres comienzan con `wrfout_d01.2017-02`.

En este punto es importante observar el tamaño de cada uno de los archivos `wrfout`. Por ejemplo, para estos 5 archivos `wrfout` cuyo tamaño varia entre 300-400 MB cada uno, el archivo de salida al final del proceso ARWpost que se obtiene puede alcanza tamaños mayores a los 5 GB. Si el intervalo es menor o se pronostican mas días, esto implicaría que el tamaño del archivo de salida aumente considerablemente. Un buen consejo es no incluir todos los archivos `wrfout` en un sólo proceso, si no posprocesar uno a uno los archivos `wrfout` para al final tener 5 archivos de salida y no sólo uno.

Con el comando `output_root_name` asignamos el nombre a los archivos de salida de ARWpost. Los otros parámetros son para indicar las variables meteorológicas y niveles de interpolación vertical que deben de tener los archivos de salida.

Para facilitar el proceso es aconsejable copiar los archivos `wrfout` a la carpeta que alberga a ARWpost, eso lo hacemos con el comando:

```
cp wrfout* /home/wrf/ARWpost/
```

Una vez listo todo lo anterior, ejecutamos el proceso ARWpost con el comando

```
./ARWpost.exe
```

para finalmente obtener 2 archivos con los nombres que les asignamos, para este ejemplo `Pronostico2017.ctl` y `Pronostico2017.dat`. Estos archivos son con los cuales se

CAPÍTULO 3. DESARROLLO DEL MODELO DE PRONÓSTICO PARA TEPUXTEPEC, MICHOACÁN, CON LA HERRAMIENTA WRF

trabajaré en GrADS.

Como ya se ha mencionado GrADS esta diseñado para la creación de mapas y gráficas de información meteorológica, por lo tanto, necesita instalarse en un sistema operativo gráfico como Windows, y no en la maquina virtual que funciona sólo a base de líneas de comandos.

Una vez instalado en un sistema operativo gráfico como Windows, es necesario transferir los archivos `Pronostico2017.ctl` y `Pronostico2017.dat` de la maquina virtual al equipo con sistema operativo gráfico. Eso se logra haciendo uso nuevamente del software *WinSCP*, mismo que se usó para transferir los archivos de re-análisis del equipo a la maquina virtual (figura 3.6), este proceso puede trazar algún tiempo por el tamaño de el o los archivos.

Para abrir los archivos `Pronostico2017.ctl` y `Pronostico2017.dat` en GrADS lo haremos con el siguiente comando:

```
open D:\Users\Desktop\Pronostico/Pronostico2017
```

Otros comandos útiles en GrADS son por ejemplo `q dims` para mostrar las dimensiones de las variables x, y, z, t del archivo, el comando `q file` para ver todas las variables meteorológicas que contiene el archivo, así como el comando `d` para mostrar información de alguna variable meteorológica específica.

Para los objetivos del presentes modelo de pronóstico del viento, las variables meteorológicas que nos interesan son la variable `u10` que se refiere a la componente u de la velocidad del viento a 10 metros de altura y la variable `v10` que se refiere a la componente

CAPÍTULO 3. DESARROLLO DEL MODELO DE PRONÓSTICO PARA TEPUXTEPEC, MICHOACÁN, CON LA HERRAMIENTA WRF

v de la velocidad del viento a 10 metros de altura también. Otras variables importantes son u y v que se refieren a las componentes del viento u y v , respectivamente, pero a diferentes alturas.

Por ejemplo, lo siguientes comandos muestran un mapa (figura 3.9) de la componente u del viento a 10 metros en el tiempo $t = 1$.

```
open D:\Users\Desktop\Pronostico/Pronostico2017
d u10
```

Si se quiere un mapa (figura 3.10) que incluya tanto a la componente u y v del viento podemos usar los siguientes comandos para crear un mapa de vectores:

```
d u ; v ; hcurl(u, v)
```

Por el contrario, si lo que nos interesa en la velocidad del viento en un punto en específico, por ejemplo de la Estación Meteorológica Temascalas, con coordenadas 20.06 latitud Norte y -100.14861 longitud Oeste, ubicada en la región de Tepuxtepec, Michoacán, usamos estos comandos:

```
set lat 20.06
set lon -100.1486
d mag(u, v)
```

Esto nos mostrará sólo una magnitud de la velocidad del viento en m/s para el punto de la malla más cercano al lugar que queremos para el tiempo $t = 1$ que es el tiempo que viene predeterminado. Si se quiere otros tiempos habrá que indicárselo al programa.

Recordemos que en este ejemplo se tienen 121 tiempos disponibles que corresponden a 5 días de pronóstico con intervalo de 1 hora.

```
set lat 20.06
set lon -100.1486
set t 1 121
d mag(u, v)
```

CAPÍTULO 3. DESARROLLO DEL MODELO DE PRONÓSTICO PARA TEPUXTEPEC, MICHOACÁN, CON LA HERRAMIENTA WRF

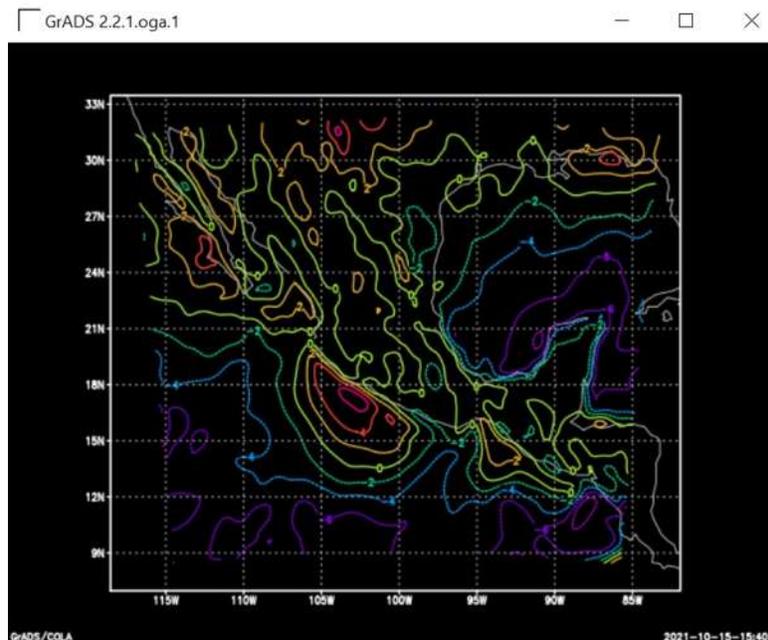


Figura 3.9: Mapa de la componente u del viento a 10 m para la fecha 1 de febrero de 2017 a las 00hrs

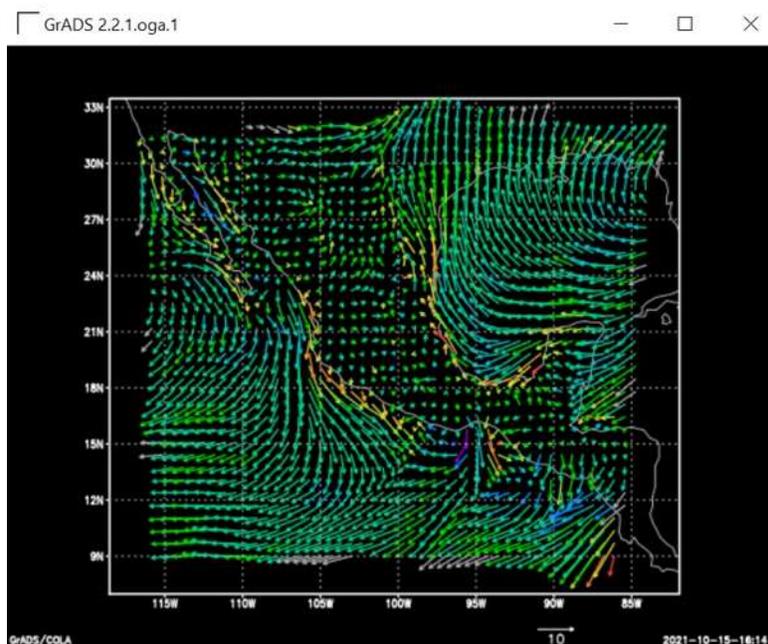


Figura 3.10: Mapa de vectores de la velocidad del viento a 10 m para la fecha 1 de febrero de 2017 a las 00hrs

CAPÍTULO 3. DESARROLLO DEL MODELO DE PRONÓSTICO PARA TEPUXTEPEC, MICHOACÁN, CON LA HERRAMIENTA WRF

Esto nos mostrará una gráfica (figura 3.11) de la velocidad del viento en m/s de la ubicación Temascales para los tiempos seleccionados.

Parte de los objetivos al desarrollar este modelo de predicción es probar que tan real



Figura 3.11: Gráfica de la velocidad del viento a 10m de altura para Temascales perteneciente a la fecha del 1 al 5 de febrero de 2017.

son sus pronósticos, por lo tanto, es necesario compararlo con datos reales observados, los cuales se encuentran en hojas de cálculo de Excel, para ello es necesario tener los datos pronosticados también en archivos Excel, y precisamente ese fue uno de los grandes retos, ya que GrADS no permite extraer esa información en forma de listas o tablas, así que la única solución fue extraer uno a uno las velocidades del viento para los 121 tiempos, lo cual, a pesar de no ser difícil, si involucra una considerable cantidad de tiempo. Se hizo de esta manera para los otros 721 datos de la segunda fecha y los 121 datos de la tercera

CAPÍTULO 3. DESARROLLO DEL MODELO DE PRONÓSTICO PARA TEPUXTEPEC, MICHOACÁN, CON LA HERRAMIENTA WRF

fecha.

Para tratar de evitar esto se exploraron otras opciones más novedosas y poco investigadas como usar softwares de computo numérico tales como MATLAB⁷ o GNU Octave⁸, se logró extraer los datos como tablas de matrices pero no fue posible establecer la relación entre los datos extraídos y las coordenadas geográficas que le corresponden. Este es un aspecto en el que se sigue trabajando.

⁷<https://www.mathworks.com/products/matlab.html>

⁸<https://www.gnu.org/software/octave/index>

Capítulo 4

Validación del Modelo de Pronóstico de Mesoescala para Tepuxtepec, Michoacán

No es suficiente con tener el modelo de pronóstico, también es necesario cuantificar su precisión, es decir, que tan cercanos son los datos pronosticados a los datos reales. Medir esa exactitud no es una tarea fácil, ya que no existe un protocolo de evaluación general que funcione con todos los modelos de predicción climática. Sólo la experimentación mostrará cuales indicadores del desempeño del modelo o KPI (Key Performance Indicator), por sus siglas en inglés, funcionan mejor para el modelo. (Vandeput, 2021)

Se define el **error** como la diferencia entre los datos pronosticados P_i y los datos observados O_i :

$$e_i = P_i - O_i \tag{4.1}$$

el cual puede ser positivo o negativo.

El **BIAS**, que se puede traducir como sesgo, propuesto por Pielke en 1984, se define

entonces como el promedio de los errores:

$$BIAS = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n e_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i) \quad (4.2)$$

El BIAS por si sólo no es suficiente para evaluar si un pronóstico es exacto, sin embargo puede ser de ayuda, ya que un BIAS de gran tamaño puede indicar que algo anda mal con el modelo.

Por definición los errores pueden fluctuar entre cantidades positivas y negativas, la suma de estas cantidades positivas y negativas en el cálculo del BIAS puede afectar la percepción de la exactitud. Entonces, un mejor indicador es el Error Promedio Absoluto o **MAE** (Mean Absolute Error) por sus siglas en inglés, definido por Stauffer y Seaman en 1990 como el promedio de los errores absolutos.

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |e_i| = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |P_i - O_i| \quad (4.3)$$

Si se tiene poca practica, es difícil interpretar sí la magnitud arrojada por el indice MAE se trata de un error pequeño o grande, para situaciones como ésta resulta más cómodo tener un error en términos porcentuales, para ello se divide el indice MAE entre el promedio de los datos observados.

$$\%MAE = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |e_i|}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n O_i} = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |P_i - O_i|}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n O_i} \quad (4.4)$$

El indice **RMSE** (Root Mean Square Error), traducido como la Raíz del Error Cuadrático Medio, es uno de los indices más útiles, de define como la raiz cuadrada del promedio de los errores cuadráticos.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n e_i^2} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2} \quad (4.5)$$

CAPÍTULO 4. VALIDACIÓN DEL MODELO DE PRONÓSTICO DE MESOESCALA PARA TEPUXTEPEC, MICHOACÁN

Al igual que con el índice MAE, en ocasiones es más conveniente tenerlo en términos porcentuales, dividiéndolo entre el promedio de los datos observados.

$$\%RMSE = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n e_i^2}}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n O_i} = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n O_i} \quad (4.6)$$

La característica común de estos índices es que, se puede afirmar que el modelo de pronóstico climático es más preciso cuando estos valores tienden a 0.

Otro estadístico que resulta realmente útil es el Coeficiente de Correlación de Anomalías o **ACC** (Anomaly Correlation Coefficient) por sus siglás en inglés, este índice funciona un poco diferente a los anteriores, ya que en este caso una tendencia a valores de 1 son sinónimo de una mayor exactitud del modelo.

$$ACC = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})(O_i - \bar{O})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2 \sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}} \quad (4.7)$$

donde \bar{P} es el promedio de los valores pronosticados y \bar{O} es el promedio de los valores observados.

De acuerdo a Clifford (2011), también se le puede asignar una categoría cualitativa al modelo de pronóstico del viento usando estos índices. Dependiendo de los valores MAE, RMSE y ACC se puede clasificar el desempeño del modelo como *Pobre*, *Aceptable*, *Bueno* y *Excelente* como se muestra en la figura 4.1.

Es importante aclarar que esta tabla fue elaborada para pronósticos de la velocidad del viento y para modelos con una resolución similar a la del presente modelo de predicción para Tepuxtepec, por lo tanto, podría no ser funcional para otro tipo de predicciones climáticas o resoluciones.

CAPÍTULO 4. VALIDACIÓN DEL MODELO DE PRONÓSTICO DE MESOESCALA PARA TEPUXTEPEC, MICHOACÁN

Grado	MAE (m/s)	RMSE (m/s)	ACC (sin unidad)
<i>Pobre</i>	> 3.0	> 3.0	< 0.50
<i>Aceptable</i>	< 3.0	< 3.0	> 0.50
<i>Bueno</i>	< 2.5	< 2.5	> 0.60
<i>Excelente</i>	< 2.0	< 2.0	> 0.75

Figura 4.1: Grados del desempeño estadístico del modelo de pronóstico del viento. Adaptado de “WRF-Model Performance for Wind Power Forecasting in the Coast Ranges of Central California” por Clifford, K. T., 2011. San Jose State University. California, USA.

Para realizar la validación del modelo de pronóstico de la velocidad del viento para Tepuxtepec, Michoacán, se compararon los valores obtenidos por el modelo de pronóstico contra valores reales observados tomados de estaciones meteorológicas, cuidando que pertenezcan a la misma fecha y sus datos contengan el mismo intervalo.

4.1. Primer grupo de datos (1 al 5 de Febrero de 2017)

Fecha: Del 1 de Febrero de 2017 a 5 de Febrero de 2017

Periodo: 5 días

Intervalo: 1 hora

Cantidad Total de Datos: 121 Datos

El primer grupo de datos pertenece al periodo del 1 de febrero de 2017 al 5 de febrero de 2017, es decir, un lapso de 5 días, con un intervalo de 1 hora entre cada dato, lo que da un total de 121 datos. Los datos reales observados pertenecen a la estación meteorológica Temascales, estación ubicada dentro de la región de Tepuxtepec, Michoacán, cuyas coordenadas son 20.06 latitud Norte y -100.148611 longitud Oeste. Los datos fueron proporcionados por un estudiante de la Facultad.

CAPÍTULO 4. VALIDACIÓN DEL MODELO DE PRONÓSTICO DE MESOESCALA PARA TEPUXTEPEC, MICHOACÁN

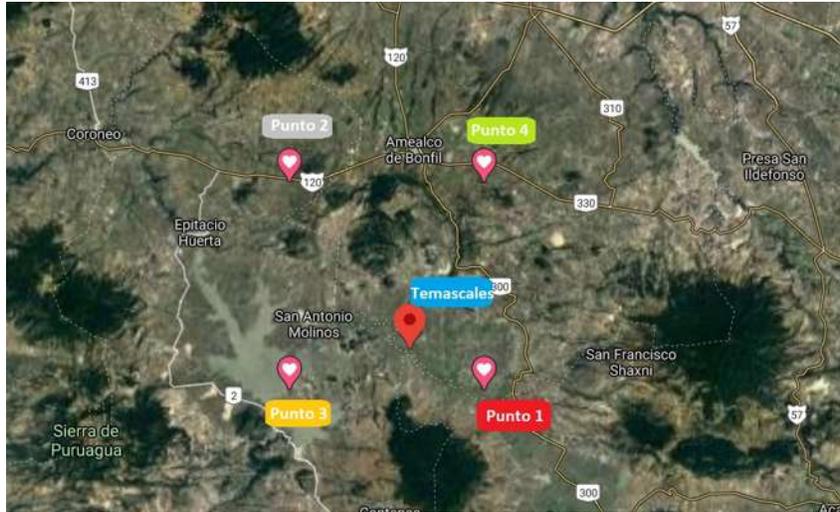


Figura 4.2: Ubicación de la estación meteorológica Temascales y los 4 puntos de la malla más cercanos

Por la resolución del modelo no existe un punto de la malla cuyas coordenadas se localicen exactamente en el sitio de la estación Temascales, razón por la cual se seleccionó los 4 puntos adyacentes más cercanos que se muestran en la figura 4.2. El Punto 1 con coordenadas 20.0331 latitud norte y -100.097 longitud oeste, el Punto 2 con coordenadas 20.1683 latitud norte y -100.232 longitud oeste, el Punto 3 con coordenadas 20.0331 latitud norte y -100.232 longitud oeste y el Punto 4 con coordenadas 20.1683 latitud norte y -100.097 longitud oeste. La distancia entre cada nodo es de 0.135° grados, aproximadamente 15 Km.

En la figura 4.3 la línea en azul representa a los datos reales registrados por la estación Temascales, las líneas en color naranja, gris, amarillo y verde representan los datos obtenidos del modelo de pronósticos de los cuatro puntos de la malla más cercanos a la estación Temascales.

De aquí podemos observar dos situaciones, la primera que los cuatro puntos de la malla

CAPÍTULO 4. VALIDACIÓN DEL MODELO DE PRONÓSTICO DE MESOESCALA PARA TEPUXTEPEC, MICHOACÁN

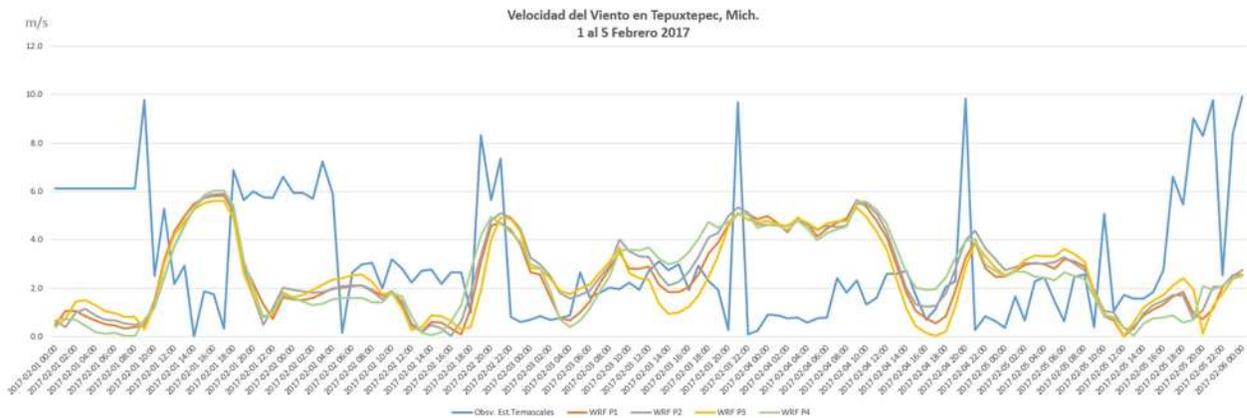


Figura 4.3: Estación Temascales: Datos reales observados vs Datos modelo del pronóstico.

gráficos se comportan de manera similar, con lo cual podemos afirmar que en la región que engloban estos puntos el viento se comporta de manera similar. El otro aspecto es que, a primera vista al observar la gráfica, podemos notar que los datos pronosticados y los datos observados no siguen el mismo comportamiento, pero haciendo una revisión más detallada de los datos observados de la estación Temascales existen dudas de su veracidad, lo cual puede ser la razón de esta discordancia, más que un problema del modelo.

Calculando los índices o KPI para este grupo de datos obtenemos que el Error Promedio Absoluto $MAE = 2.6174$, lo que coloca al modelo de acuerdo a la tabla de Clifford (2011) en un desempeño aceptable; la Raíz del Error Cuadrático Medio $RMSE = 3.3378$, lo que significa un desempeño pobre; y el Coeficiente de Correlación de Anomalías $ACC = 0.5629$, dentro del rango aceptable. Con errores porcentuales de 0.8600% para el MAE y 1.0967% para el RMSE.

$$MAE = 2.6174 \quad (4.8)$$

$$\%MAE = 0.8600\% \quad (4.9)$$

$$RMSE = 3.3378 \quad (4.10)$$

$$\%RMSE = 1.0967\% \quad (4.11)$$

$$ACC = 0.5629 \quad (4.12)$$

De aquí podemos concluir que el modelo tiene un desempeño aceptable, a pesar de las dudas sobre la veracidad de los datos observados.

4.2. Segundo grupo de datos (1 al 5 Abril 2021)

Fecha: Del 1 de Abril de 2021 a 5 de Abril de 2021

Periodo: 5 días

Intervalo: 10 minutos

Cantidad Total de Datos: 720 Datos

El segundo grupo de datos corresponde a datos observados por las Estaciones Meteorológicas Automatizadas (EMAs) de las estaciones Huimilpan, Mariposa Monarca y Atlacomulco, que pertenecen al periodo del 1 de abril de 2021 a 5 de abril de 2021, es decir, un lapso de 5 días, con un intervalo de 10 minutos entre cada dato, lo que da un total de 720 datos. Estos datos fueron obtenidos de la pagina de Internet de las Estaciones Meteorológicas Automatizadas¹ que administra el Sistema Meteorológico Nacional.

¹<https://smn.conagua.gob.mx/es/observando-el-tiempo/estaciones-meteorologicas-automaticas-ema-s>

CAPÍTULO 4. VALIDACIÓN DEL MODELO DE PRONÓSTICO DE MESOESCALA PARA TEPUXTEPEC, MICHOACÁN

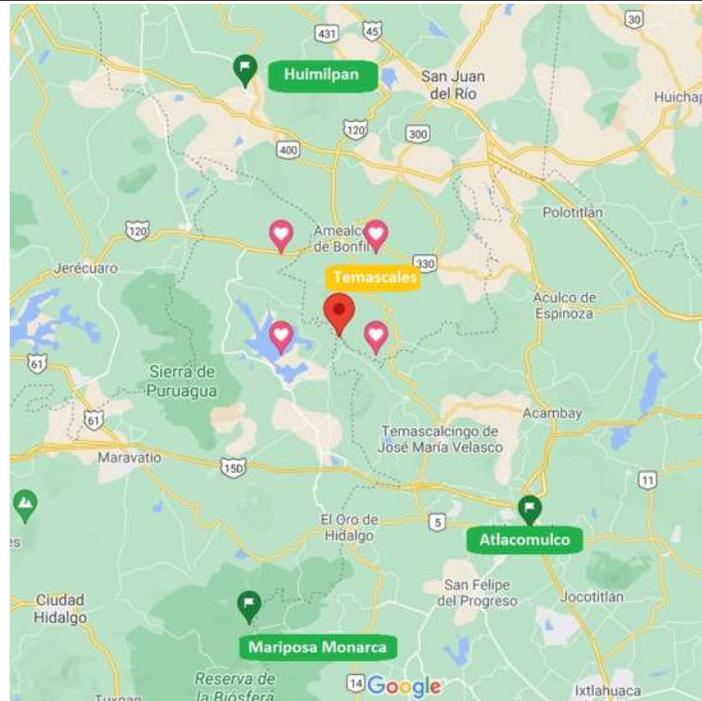


Figura 4.4: Ubicación de las Estaciones Meteorológicas Automatizadas (EMAs) de Huimilpan, Mariposa Monarca, Atacomulco y la estación Temascales.

Las desventajas de estos datos es que se encuentran más alejados de la región de Tepuxtepec, como se muestra en la figura 4.4, la ventaja es que se trata de datos más actuales, con un intervalo de 10 minutos entre cada dato, lo que da una mayor cantidad de datos para gráficar y hacer el análisis estadístico.

En la Figura 4.5 y 4.6, la línea en amarillo representa a los datos arrojados por el modelo de pronóstico del punto mas cercano a la estación Temascales, con coordenadas 20.0331 latitud norte y -100.097 longitud oeste; la línea en azul representa a los datos observados de la estación Huimilpan, con coordenadas 20.39027778 latitud norte y -100.2836111 longitud oeste; la línea en naranja representa a los datos de la estación Mariposa Monarca, con coordenadas 19.67088889 latitud norte y -100.27775 longitud oeste; y la línea en gris

CAPÍTULO 4. VALIDACIÓN DEL MODELO DE PRONÓSTICO DE MESOESCALA PARA TEPUXTEPEC, MICHOACÁN



Figura 4.5: Velocidad del viento pronosticadas por el modelo WRF Vs. Datos observados de las Estaciones Meteorológicas Huimilpan, Mariposa Monarca y Atlacomulco.

representa a los datos de la estación Atlacomulco, con coordenadas 19.79928333 latitud norte y -99.87735 longitud oeste.

Al observar la gráfica podemos notar que las velocidades del viento pronosticadas por el modelo WRF siguen un comportamiento similar al de las velocidades del viento registradas por las Estaciones Meteorológicas Automatizadas. Para realizar el análisis estadístico se tomó un promedio de las velocidades del viento de las 3 estaciones automatizadas en cada uno de los 720 datos. El análisis estadístico arrojó que los valores para el Error Promedio Absoluto $MAE = 3.4981$ y la Raíz del Error Cuadrático Medio $RMSE = 4.1272$ colocan al modelo en un desempeño pobre, según lo propuesto por Clifford (2011), con errores porcentuales de entre 1% y 2%. Aunque para el Coeficiente de Correlación de Anomalías $ACC = 0.6584$, el modelo se encuentra con un desempeño bueno.

$$MAE = 3.4981 \quad (4.13)$$

$$\%MAE = 1.5755\% \quad (4.14)$$

$$RMSE = 4.1272 \quad (4.15)$$

$$\%RMSE = 1.8588\% \quad (4.16)$$

$$ACC = 0.6584 \quad (4.17)$$

CAPÍTULO 4. VALIDACIÓN DEL MODELO DE PRONÓSTICO DE MESOESCALA PARA TEPUXTEPEC, MICHOACÁN

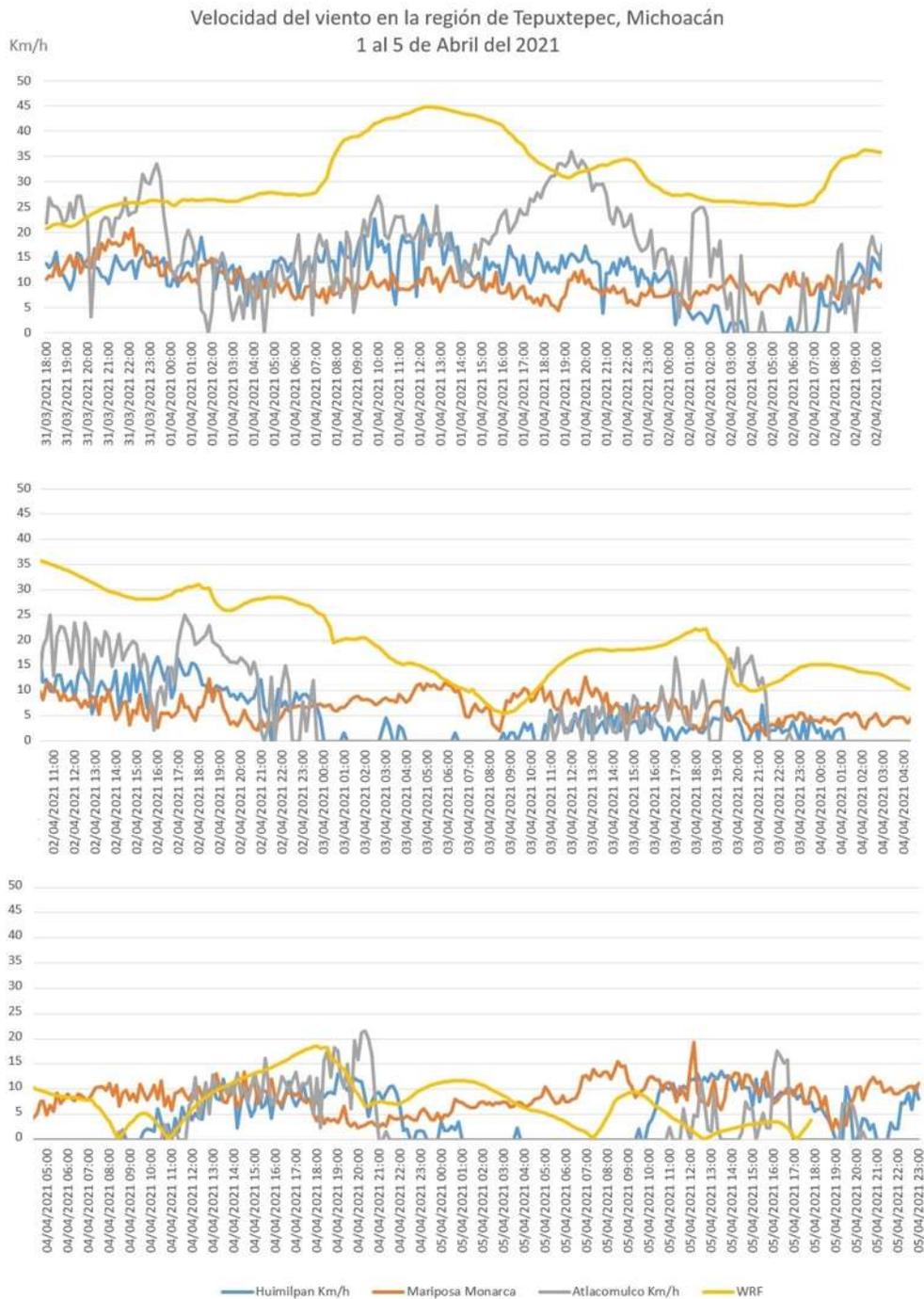


Figura 4.6: Velocidad del viento pronosticadas por el modelo WRF Vs. Datos observados de las Estaciones Meteorológicas Huimilpan, Mariposa Monarca y Atacomulco [Versión ampliada]

4.3. Tercer grupo de datos (1 al 10 de Noviembre de 2020)

Fecha: Del 1 de Noviembre de 2020 a 10 de Noviembre de 2020

Periodo: 10 días

Intervalo: 1 hora

Cantidad Total de Datos: 241 Datos

El tercer grupo de datos pertenece a mediciones de la velocidad del viento del periodo del 1 de noviembre de 2020 al 10 de noviembre de 2020, es decir, un lapso de 10 días, con un intervalo de 1 hora entre cada dato, lo que da un total de 241 datos. Los datos reales observados fueron obtenidos directamente de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) y corresponden a la Estación Meteorológica Temascales, ubicada en la región de Tepuxtepec, Michoacán.

En la figura 4.7 y 4.8, la línea en azul representa a las velocidades del viento reales observadas pertenecientes a la Estación Meteorológica Temascales, con coordenadas 20.06 Latitud Norte y -100.1486111 Longitud Oeste, la línea en naranja representa a los datos del viento pronosticados por el modelo en el punto de la malla más cercano a la estación, con coordenadas 20.0331 Latitud Norte y -100.097 Longitud Oeste.

Respecto al análisis estadístico, para este tercer grupo de datos, el Error Promedio Absoluto $MAE = 1.5984$, otorgándole al modelo un grado excelente; la Raíz del Error Cuadrático Medio $RMSE = 2.0766$, colocan al modelo con un buen desempeño; y el Coeficiente de Correlación de Anomalías $ACC = 0.7428$, lo que categoriza al modelo en

CAPÍTULO 4. VALIDACIÓN DEL MODELO DE PRONÓSTICO DE MESOESCALA PARA TEPUXTEPEC, MICHOACÁN

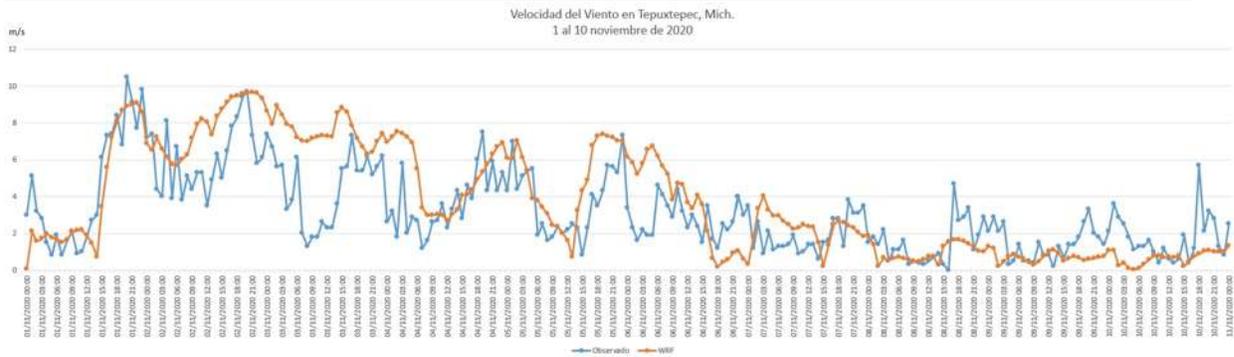


Figura 4.7: Estación Temascales: Velocidades del viento reales observadas vs Velocidades del viento pronosticadas por el modelo WRF

un grado bueno.

$$MAE = 1.5984 \quad (4.18)$$

$$\%MAE = 0.5050\% \quad (4.19)$$

$$RMSE = 2.0766 \quad (4.20)$$

$$\%RMSE = 0.6561\% \quad (4.21)$$

$$ACC = 0.7428 \quad (4.22)$$

Observado los datos graficados y los resultados de los índices podemos afirmar que el desempeño del modelo de pronóstico es al menos bueno.

CAPÍTULO 4. VALIDACIÓN DEL MODELO DE PRONÓSTICO DE MESOESCALA PARA TEPUXTEPEC, MICHOACÁN

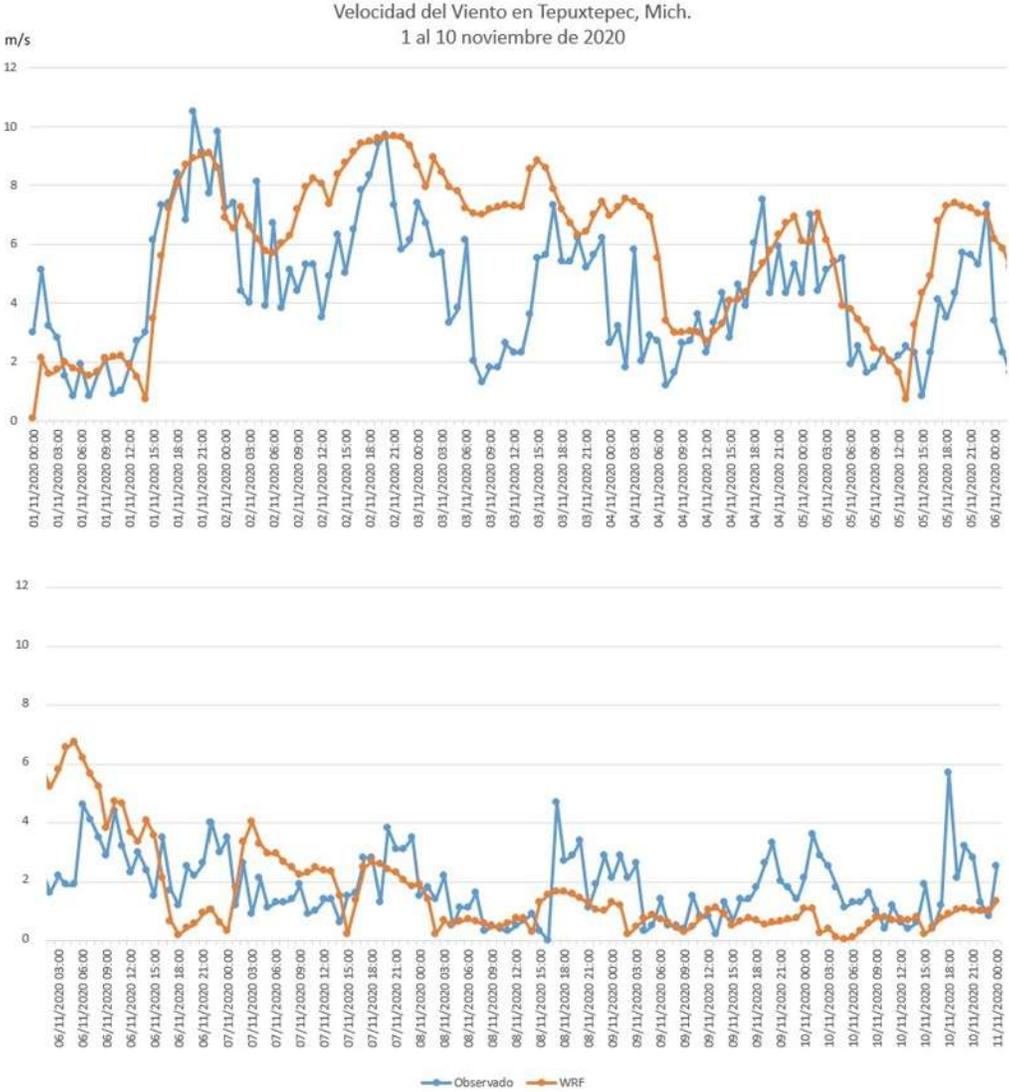


Figura 4.8: Estación Temascales: Velocidades del viento reales observadas vs Velocidades del viento pronosticadas por el modelo WRF [Versión ampliada]

Conclusiones

El objetivo del presente trabajo de investigación no solamente se centró en establecer un modelo de pronóstico para la zona de Tepuxtepec, Michoacán, cuya verificación del recurso eólico muestra es la más grande en el Estado de Michoacán, sino además que el modelo arroje resultados consistentes con la realidad, razón por la cual se puso especial énfasis en la validación de modelo.

De los tres grupos de datos utilizados para la validación, el tercer grupo es el que mostró mejores resultados en los índices, lo que también se refleja en la gráfica. Pero esto no es casualidad, ya que, de los tres grupos de datos, estos últimos son los más confiables, por ser actuales, pertenecer exactamente a la estación Temascales y ser obtenidos directamente de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), a diferencia del primer grupo de datos cuyo origen es dudoso y el segundo grupo de datos que son de estaciones más alejadas.

Analizando los índices, observando las gráficas, y considerando los posibles factores que afectan los resultados, podemos concluir que el modelo de pronóstico de mesoescala de la velocidad del viento desarrollado para Tepuxtepec, Michoacán, posee un desempeño entre aceptable y bueno, generando pronósticos de la viento confiables y acordes con

CAPÍTULO 4. VALIDACIÓN DEL MODELO DE PRONÓSTICO DE MESOESCALA PARA TEPUXTEPEC, MICHOACÁN

observaciones reales. Por lo tanto, cumpliendo con las expectativas deseadas para este trabajo de investigación.

Bibliografía

- [1] AEMET (2018). *Glosario Meteorológico Visual AEMET*. Agencia Estatal de Meteorología. España. <https://meteoglosario.aemet.es/>. Consultado el 16 de mayo de 2021.
- [2] Al-Yahyai, S., Charabi, Y., Gastli, A. (2010). Review of the use of Numerical Weather Prediction (NWP) Models for wind energy assessment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(2010), 3192-3198. <https://www.elsevier.com/locate/rser>
- [3] AMDEE (2019). *El potencial eólico mexicano: Oportunidades y retos en el nuevo sector eléctrico*. Asociación Mexicana de Energía Eólica. México. Recuperado de <https://amdee.org/Publicaciones/AMDEE-PwC-El-potencial-eolico-mexicano.pdf>
- [4] AZEL (2019). *Atlas Nacional de Zonas con Alto Potencial de Energías Limpias (AZEL)*. Secretaría de Energía del Gobierno Federal. Recuperado de <https://dgel.energia.gob.mx/azel/mapa.html?lang=es>
- [5] Bernabé, M., Cadenas, E., y Morales C. (Octubre de 2020). Elaboración de un mapa eólico para el Estado de Michoacán utilizando datos del servidor NASA Giovanni. Ponencia llevada a cabo en el XIV Congreso Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación, Morelia, Michoacán.
- [6] Bramer, Lisa (2013). *Methods for modeling and forecasting wind characteristics* (Tesis). Iowa State University. Ames, Iowa. Recuperado de <http://lib.dr.iastate.edu/etd/13605>
- [7] Castañeda, J. C. (2018). *Emplazamiento eólico incorporado a la red eléctrica en el estado de Michoacán* (Tesis de maestría). Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Morelia, Michoacán, México.
- [8] Clifford, K. T. (2011). *WRF-Model Performance for Wind Power Forecasting in the Coast Ranges of Central California* (Master's Theses). San Jose State University. California, USA. Recuperado de https://scholarworks.sjsu.edu/etd_theses/4043
- [9] COMET (2011). *Definición de mesoescala*. University Corporation for Atmospheric Research. Recuperado de <https://www.meted.ucar.edu/mesoprim/mesodefns/print.html>

- [10] Duda, Michael (2021). *The WRF Pre-Processing System (WPS): Fundamental Capabilities* [Presentación]. WRF User's Tutorial January 2021. UCAR. Recuperado de https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/tutorial/presentation_pdfs/202101/duda_wps-general.pdf
- [11] Gallego, A., Gonzáles, I., Sánchez, B., Fernández, P., Garcinuño, R., Martínez, R., Bravo, J., Pradana, J., Navarro, R., y Durand, J. (2012). *Contaminación Atmosférica*. Universidad Nacional de Educación a Distancia. España.
- [12] George Mason University. (2018). *Grid Analysis and Display System* (version 2.2.1) [Software]. Windows. VA, USA: GNU. Recuperado de <http://cola.gmu.edu/grads/>
- [13] Gobierno de México (2019). *Posicionamiento oficial para la participación de la delegación mexicana en la 25 conferencia de las partes de la convención marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático, a celebrarse del 2-13 de diciembre de 2019, en Madrid, España*. Recuperado de <https://www.gob.mx/inecc/documentos/posicionamiento-de-la-delegacion-mexicana-rumbo-a-la-cop-25>
- [14] Grid Analysis and Display System (s.f.). *Overview of GrADS*. <http://cola.gmu.edu/grads/> Consultado el 27 de octubre de 2020.
- [15] Iberdrola (2020). *Funcionamiento de los parques eólicos terrestres*. <https://www.iberdrola.com/medio-ambiente/como-funcionan-parques-eolicos-terrestres> Consultado el 24 de diciembre de 2020.
- [16] Lee, J. y Zhao, F. (2020). *Global Wind Report 2019*. Global Wind Energy Council. Brussels, Belgium. Consultado por Internet el 14 diciembre del 2020. Recuperado de https://gwec.net/wp-content/uploads/2020/08/Annual-Wind-Report_2019_digital_final_2r.pdf
- [17] Lee, J. y Zhao, F. (2021). *Global Wind Report 2019*. Global Wind Energy Council. Brussels, Belgium. Consultado por Internet el 23 agosto del 2021. Recuperado de <https://gwec.net/wp-content/uploads/2021/03/GWEC-Global-Wind-Report-2021.pdf>
- [18] Lynch, Peter. (2007). The origins of computer weather prediction and climate modeling. *Journal of Computational Physics*, 227(2008), 3431-3444. Recuperado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0021999107000952>
- [19] Met Office (2021). *Numerical weather prediction models, United Kingdom Unified Model (UKMO)*. <https://www.metoffice.gov.uk/research/approach/modelling-systems/unified-model/weather-forecasting> Consultado el 8 de junio de 2021.
- [20] Montoya, Gerardo de Jesus (2008). *Lecciones de meteorología dinámica y modelamiento atmosférico*. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia.

- [21] OMSZ (2021). *Main characteristics of the ALADIN and AROME NWP models: Hungarian Meteorological Service (OMSZ)*. <https://www.met.hu/en/omsz/tevekenysegek/idojarasmodellezes/modellek/> Consultado el 8 de junio de 2021.
- [22] Oracle. (2020). *Oracle VM VirtualBox* (version 6.1.16) [Software]. Windows. CA, USA: MIT. Recuperado de <https://www.virtualbox.org/>
- [23] Orlanski, I. (1975). A Rational Subdivision of Scales for Atmospheric Processes. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 56(5), 527-530. Recuperado de <http://www.jstor.org/stable/26216020>
- [24] Prikryl, M. (2021). *WinSCP* (version 5.17.10) [Software]. Windows. Prague, Czech Republic: GNU. Recuperado de <https://winscp.net/eng/index.php>
- [25] Saito, Kazuo. (2007). Nonhydrostatic Atmospheric Models and Operational Development at JMA. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 85B(2007), 271-304. DOI: 10.2151/jmsj.85B.271
- [26] Schreck, S., Lundquist, J., and Shaw, W. (2008). *U.S. Department of Energy workshop report: Research needs for wind resource characterization*. Technical Report 500-43521. Department of Energy.
- [27] Seinfeld, J. H., Pandis, S. N. (2012). *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change*. Hoboken, New Jersey: John & Wiley Sons.
- [28] Sherman, G. (2020). *QGIS* (version 3.20.3) [Software]. Windows. Boston: GNU. Recuperado de <https://www.qgis.org/es/site/>
- [29] Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Barker, D. M., Duda, M. G., Huang, X.-Y., Wang, W., and Powers, J. G. (2008). *A Description of the Advanced Research WRF Version 3*. National Center for Atmospheric Research. Bolder, Colorado, USA. Doi:10.5065/D68S4MVH
- [30] Suárez, G. (2014). *Evaluación del recurso eólico en el Estado de Michoacán: identificación preliminar* (Tesis de licenciatura). Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Morelia, Michoacán, México.
- [31] Sultan, Hamada (2011). *Ensemble forecasting and data assimilation in Numerical Weather Modeling for Egypt* (Master thesis). Cairo University. Giza, Egypt.
- [32] Talayero Navales, A.P., Telmo Martínez, E. (2011). *Energía eólica* (Serie Energías renovables) (2^a ed.). Prensas de la Universidad de Zaragoza. España. Recuperado de <https://books.google.com.mx/books?id=ML7uDAAAQBAJ>
- [33] Tatham, S. (2019). *PuTTY* (version 0.76) [Software]. Windows. Cambridge, England: MIT. Recuperado de <https://www.chiark.greenend.org.uk/~sgtatham/putty/>

BIBLIOGRAFÍA

- [34] Vandeput, N. (2021). *Data Science for Supply Chain Forecasting*. Walter de Gruyter GmbH. DOI:10.1515/9783110671124. Recuperado de <https://books.google.com.mx/books?id=HOY9yAEACAAJ>
- [35] Werner, Kelly (2021). *WRF Data, Utilities, & Post-processing* [Presentación]. WRF User's Tutorial January 2021. UCAR. Recuperado de https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/tutorial/presentation_pdfs/202101/werner_data_util_pp.pdf
- [36] Windy App (2021). *The guide to weather forecast models all around the world*. <https://windy.app/> Consultado el 8 de junio de 2021.