



FACULTAD DE MATEMÁTICA, ASTRONOMÍA Y FÍSICA
DEPARTAMENTO DE COMPUTACIÓN

TESIS DE LICENCIATURA

**Herramientas Geoespaciales Vinculadas a Índices Meteorológicos de
Incendios Forestales**

Autor:

Kevin Ayrton CLEMOVEKI

Directora:

Mg. Estefanía DE ELÍA

Director:

Dr. Marcelo SCAVUZZO



Herramientas Geoespaciales Vinculadas a Índices Meteorológicos de Incendios Forestales por Clemoveki Kevin Ayrton se distribuye bajo una Licencia Creative Commons Atribución-CompartirIgual 2.5 Argentina.

Ver más en <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.5/>

Agradecimientos

- A mi familia, mis padres Carlos y Mirta quienes me formaron como persona con su apoyo constante y sus consejos. A mis hermanos Leonel, Alexis y Aldana por todo lo compartido y todo la contención que me brindaron. Los agradecimientos también son extensivos a todos mis familiares, los cuales siempre están presentes con sus deseos de bienestar y que son la base de contención que me permitió transitar con seguridad en todos los altibajos que la vida propone.
- A mis directores Marcelo Scavuzzo y Estefanía De Elía por la coordinación, predisposición y la confianza que tuvieron en todo momento para poder llevar a cabo esta tesis.
- A mis compañeros de la facultad, Daniel, Fernando, Maximiliano, Andres, Emanuel, Franco, Alan, Gonzalo, Rodrigo, Federico, con quienes compartí durante estos grandiosos 5 años lindas tardes de metegol. El agradecimiento a Daniel y Fernando es especial por ayudarme en cada dificultad tanto en lo académico como en lo personal.
- También quiero agradecer a todos los integrantes del Intituto Gulich, especialmente a Verónica, Andrés, Mario, Fernanda, Carlos y Sofia, por su calidez humana y la oportunidad que me brindaron al integrarme en su grupo de trabajo para llevar adelante esta tesis.

Resumen

En esta tesis se aborda la puesta operativa del índice de peligrosidad meteorológico - Forest Fire Danger Index (FFDI) (McArthur. 1967) con el objetivo de satisfacer la necesidad de contar con datos de predicción meteorológica, para ser utilizados en sistemas de alerta temprana a emergencias desarrollados para CONAE, UNC, INTA y otros potenciales usuarios externos. La automatización completa de los procesos involucrados culmina con la publicación diaria de los datos generados en un servidor web. Se ofrece la opción de descarga en distintos formatos comúnmente utilizados en sistemas, modelos o algoritmos. Esta última modalidad no se brinda actualmente desde ninguna institución pública. Finalmente, cabe destacar que las herramientas computacionales utilizadas en esta tesis son de acceso libre y gratuito.

Palabras Claves:

Índice de Incendio, Meteogramas, Fuego, Sistema de Información Geográfica.

Clasificación del Trabajo:

D. Software

Índice general

Agradecimientos	2
Resumen	3
Introducción	2
1.1. Motivación	2
1.2. Revisión Bibliográfica	3
1.3. Objetivos	7
1.4. Contexto Inter-institucional	7
1.5. Organización de la Tesis	8
Desarrollo e Implementación del Software	10
2.1. Requerimientos	10
2.1.1. Módulos de Entradas	10
2.1.2. Administración de Datos	11
2.1.3. Backup y Reestablecimiento de datos	11
2.1.4. Datos de Salida	12
2.1.5. Interfaz web	12
2.2. Arquitectura	14
2.3. Diseño	19
2.3.1. Casos de Uso	19
2.3.2. Diagrama de Clases	21
2.4. Desarrollo	24
2.4.1. Implementaciones y resultados	24
2.4.2. GRASS GIS	36
Modelo Meteorológico WRF/CAEARTE	39
3.1. Introducción	39
3.2. Características de la Implementación	39
3.3. Descripción de los Productos	41
3.4. Desarrollo Módulos de Meteogramas	42
3.4.1. Requerimientos	42
3.4.2. Módulos de Entradas	42
3.4.3. Administración de Datos	43
3.4.4. Interfaz web	43
3.4.5. Arquitectura	43

3.4.6. Diseño y Desarrollo	45
Modelo Forest Fire Danger Index (McArthur. 1967)	49
4.1. Descripción del Algoritmo	49
4.1.1. Factor de Sequía	51
4.1.2. KBDI	52
4.1.3. Ecuaciones	54
Funcionamiento Operativo	56
5.1. Instalación del sistema CS-FFDI	56
5.1.1. Requisitos mínimos del Software	56
5.1.2. Instalación de GRASS GIS 7.1:	56
5.1.3. Configuración de GRASS para el sistema CS-FFDI:	57
5.1.4. Compilación del modelo	57
5.2. Validación del sistema	58
5.2.1. Testing	58
5.2.2. Análisis Estadísticos	61
Conclusión	68
6.1. Trabajos Futuros	68
Bibliografía y Referencias	69

Introducción

1.1. Motivación

Los incendios forestales representan una importante amenaza a los sistemas naturales y productivos de Argentina, en particular es destacable la amenaza sobre las Áreas Naturales Protegidas y el sector forestal. Según datos del Plan Nacional de Estadística Forestal (PNEF) (2001-2009) [1-9], en Argentina se queman en promedio 1.5 millones de hectáreas por año, afectando poblaciones y distintos tipos de sistemas productivos. Las zonas más afectadas del país corresponden a la región Pampeana, Patagónica y Centro respectivamente. De acuerdo a las características de cada región, la ocurrencia de incendios está relacionada a distintas causas. La región Centro y Norte indican tener la mayor proporción de incendios causados en forma intencional (40 %), las cuales están asociadas en su mayoría a la conversión de zonas naturales en áreas productivas y al manejo de pastizales para la ganadería. La negligencia es más importante en la región NEA (43 %), asociadas al turismo, o a las consideradas malas prácticas ganaderas. Las causas naturales, se ubican en su mayoría en la región Pampeana (7.5 %), a partir de la ignición por rayos. Además, una gran cantidad del total de las causas, para todas las regiones, son de origen desconocido (39 %). La proporción de los tipos de vegetación más afectados a nivel Nacional, corresponden a Arbustales (66.5 %), Pastizales (18.7 %), y Bosques Nativos (14.2 %), variando de acuerdo a la zona Fito geográfica afectada.

Considerando un análisis regional, la Argentina ocupa el tercer puesto en cuanto a superficie afectada en Latinoamérica, Bolivia ocupa el segundo y Brasil el primer lugar (Fire Management Working papers, 2005.FAO). Es importante destacar que la Argentina tiene una proyección de crecimiento de la producción agrícola de (30 %) para los próximos 8 años (solo considerando cultivos de granos) [10] lo que tendrá como consecuencia que 10 millones de hectáreas de tierras serán reconvertidas para un uso productivo (PEA2). En tal proceso de expansión, está implícito el uso del fuego como herramienta de manejo, lo cual impactará en el número de incendios y superficies quemadas, probablemente acentuando la proporción de incendios que actualmente son relacionados a actividades agrícolas (40 %). Por otro lado, es importante tener en consideración, que para los diversos escenarios de cambio climático planteados para el futuro [11] [12], están previstos aumentos de temperatura de la superficie terrestre, lo cual tendrá de acuerdo a las características de cada ecosistema, incidencia en el nivel de riesgo de incendios, asociado a periodos de sequía prolongados [13].

Tanto la prevención, la detección, y el seguimiento de incendios, como la cuantificación de los efectos causados por el fuego para los diversos sistemas productivos y áreas naturales del país, constituyen actividades fundamentales en el ámbito de la gestión de los Recursos Naturales (RN), la producción forestal, el manejo agrícola-ganadero, la conservación y manejo de los Recursos Hídricos, y la gestión de Áreas Naturales Protegidas (ANP's). En países como Brasil, México, EE.UU y Sudáfrica, la problemática de los incendios ha sido abordada desde distintas áreas, abarcando universidades, agencias espaciales y organismos públicos por citar algunos. Una de las mayores inversiones en tecnología para el conocimiento y el manejo de incendios, es la utilización de sensores remotos aplicados para el monitoreo de incendios (ej.: NOAA-AVHRR, GOES, MODIS y VIIRS). Desde la década del 80, esta tecnología viene siendo aplicada a nivel global, generando información sobre la localización de incendios en forma diaria y operativa hasta la fecha [14].

En Argentina, la CONAE a través de su Plan Nacional Espacial [15] ha definido al manejo de emergencias como una de las áreas prioritarias de aplicación de información espacial, abarcando éste la vigilancia y el seguimiento de emergencias y catástrofes naturales o antrópicas. Desde el año 2003 la CONAE cuenta con un sistema de detección de focos de calor provisto por el sensor MODIS, que procesa en su propia antena de captura en falda del Carmen, Córdoba. Por otro lado, el INTA, cuenta con una antena de captura ubicada en Castelar, Buenos Aires, donde procesa y provee datos sobre índices de peligrosidad de incendios y focos de calor.

La tecnologías geoespaciales incluyendo información provista por sensores remotos, ofrece la posibilidad de generar herramientas de gran utilidad en el ámbito de la prevención, el control, y la evaluación de daños por incendios. El Sistema de Alerta y Respuesta Temprana a incendios de vegetación (SARTiv)[16][17], surge como una iniciativa de CONAE/UNC, para responder a los requerimientos del sector forestal y del sistema de Parques Nacionales. En este contexto, el principal objetivo de esta tesis se orienta a la implementación de los módulos del SARTiv vinculados al riesgo derivado de las condiciones meteorológicas. Se desarrollará un nuevo análisis de los requerimientos de los usuarios, a partir del cual se re-especificarán de los productos y la arquitectura del sistema.

1.2. Revisión Bibliográfica

Los incendios forestales son un problema ambiental serio que causa cuantiosas pérdidas en términos de vidas humanas, daño ambiental, daños a la propiedad y otros bienes. El potencial para la ocurrencia y desarrollo de los incendios forestales depende de la interacción de los materiales combustibles con variables como la temperatura del aire, la humedad ambiente y la velocidad del viento. Otros factores como los atributos de la topografía y factores aleatorios como los incendios intencionales son también importantes en la determinación del nivel de peligro de fuego. Incorporar la totalidad de estos factores

en un único índice numérico que describa el riesgo de incendio es por lo tanto una tarea muy complicada (Cheney and Gould, 1995)[18]. Sin embargo, para asistir en el manejo del fuego, se han desarrollado índices numéricos que clasifican el peligro de incendios, a partir de la integración de ciertos factores cuantificables que contribuyen en el riesgo de incendios (Chandler et al., 1983)[19]. Muchos de estos sistemas se basan en información asociada al contenido de humedad de los combustibles, variables climáticas relacionadas al fuego y efectos de la sequía.

El contenido de humedad de una muestra de combustible se define como la humedad relativa de la masa de la muestra cuando se la compara con la masa de la muestra seca al horno y se expresa como porcentaje. El contenido de humedad de un combustible cambia en respuesta a varios procesos físicos que incluyen los efectos del calor latente, la evaporación y la lluvia (Viney, 1991)[20].

La cantidad de humedad presente en los combustibles es un factor clave que afecta el potencial de incendios y el comportamiento del fuego. Evaluar la cantidad de humedad en los sustratos combustibles es entonces una consideración importante en las prácticas de manejo de fuego, como las quemas planificadas, donde se desea un comportamiento del fuego dentro de ciertos umbrales, y en el control de fuegos naturales debido al efecto que pueden tener los bajos contenidos de humedad en la intensidad del fuego y la posibilidad de reconocer fuegos lejos de la principal línea de fuego. Un medio efectivo para estimar el contenido de humedad del combustible con un grado razonable de precisión es una herramienta esencial en el manejo del fuego (Sharples et al., 2009)[21]. El clima es un factor determinante en los incendios y el régimen del fuego es muy sensible al clima. Las variables climáticas asociadas al fuego incluyen la temperatura, la humedad relativa o temperatura en el punto de rocío y la velocidad y dirección del viento. La temperatura y la humedad ambiente son variables muy importantes asociadas al fuego: la temperatura se puede pensar como un proxy de la radiación solar, que junto con la humedad relativa afecta directamente los procesos de evaporación y transpiración. El viento también tiene una fuerte influencia en el potencial de fuego, y en la dirección y velocidad de propagación del fuego. El viento colabora en la combustión al propagar las llamas hacia material combustible no quemado aún, proveer oxígeno al fuego y llevarse el aire húmedo que de otra manera restringir la cantidad de calor disponible para encender combustible no quemado. La sequía también tiene un impacto significativo sobre la ocurrencia y el desarrollo del fuego, debido a su efecto de largo plazo sobre el contenido de humedad de los combustibles. Los efectos de la sequía determinados por el conocimiento de la lluvia precedente son típicamente considerados como una medida de la proporción de combustible disponible para quemarse (McArthur, 1967)[22].

Para estimar el potencial de ocurrencia y desarrollo de incendios, se han generado una serie de métodos en distintas partes del mundo que combinan información del clima y los combustibles en índices de riesgo de incendio.

Tales índices proveen una medida de la probabilidad de que un fuego comience en un determinado lugar, su velocidad de propagación, intensidad y dificultad de controlarlo, a partir de combinaciones de las variables antes mencionadas: contenido de humedad de los

combustibles, temperatura, humedad relativa, velocidad del viento y efectos de la sequía. Los índices de riesgo de incendio son normalmente usados para declarar prohibiciones de quemas, determinar niveles de preparación para controlar incendios, organizar quemas planificadas, disponer y asignar recursos e informar a la población, además de evaluar el potencial comportamiento del fuego de modo operativo (Gill et al., 1987)[23]. En las décadas pasadas, una variedad de sistemas de clasificación del riesgo de incendio basados en diferentes variables meteorológicas se han desarrollado para diferentes partes del mundo. Tal es el caso del índice de peligro de incendio forestal de McArthur en Australia (FDI, McArthur 1967)[22], el índice de fuego basado en clima en Canadá (FWI, Van Wagner 1987)[24] y el sistema nacional de estimación de peligro de incendio de Estados Unidos (NFDRS, Deeming et al. 1977)[25]. Todos estos sistemas integrados incluyen sub-modelos para estimar la humedad de los combustibles, como el índice de sequía de Keetch-Byram (KBDI) del modelo americano, el código de humedad de los combustibles finos (FFMC), el código de humedad (DMC) y el código de sequía (DC) del FWI canadiense, y el factor de sequía (DF) e índice de peligro de incendio forestal (FFDI) del FDI australiano (Griffiths, 1999 [26]; Noble et al., 1980 [27]).

En la actualidad, el Plan Nacional de Manejo del Fuego (PNMF) es el organismo nacional argentino encargado de luchar contra los incendios declarados en áreas naturales o rurales. Creada en 1996, esta entidad depende de la Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación.

La evaluación del peligro de incendios de este Programa, se realiza mediante el Índice Meteorológico de Peligro de Incendios FWI. El mismo se encuentra implementado en la Argentina desde hace más de 10 años. Este indicador permite prever las condiciones de peligro de incendios. Se capacita continuamente a las distintas jurisdicciones del país, para lograr el más eficiente Sistema de Alerta temprana posible, clave para definir las medidas de prevención y de presupresión.

Se divide al país en áreas operativas, las cuales son atendidas, de acuerdo a los requerimientos pertinentes, por equipos aéreos y terrestres. La lucha contra incendios es llevada a cabo en forma coordinada por todas las instituciones adherentes municipales, provinciales y nacionales.

Áreas operativas:

1. Noroeste
2. Norte
3. Noreste
4. Centro
5. Pampeana
6. Patagonia

Bases operativas: San Salvador de Jujuy, Santa Rosa (Corrientes), Apóstoles (Misiones), Paso de los Libres (Corrientes), Ciudad de La Rioja, Colón (Entre Ríos), Victoria

(Entre Ríos), Ciudad de Mendoza, Alvear (Santa Fe), La Plata, Villa Gesell, Necochea, Santa Rosa (La Pampa), San Martín de los Andes, San Carlos de Bariloche, El Bolsón, Trevelín, Zárate.

El producto generado por este organismo se expone en la siguiente figura:

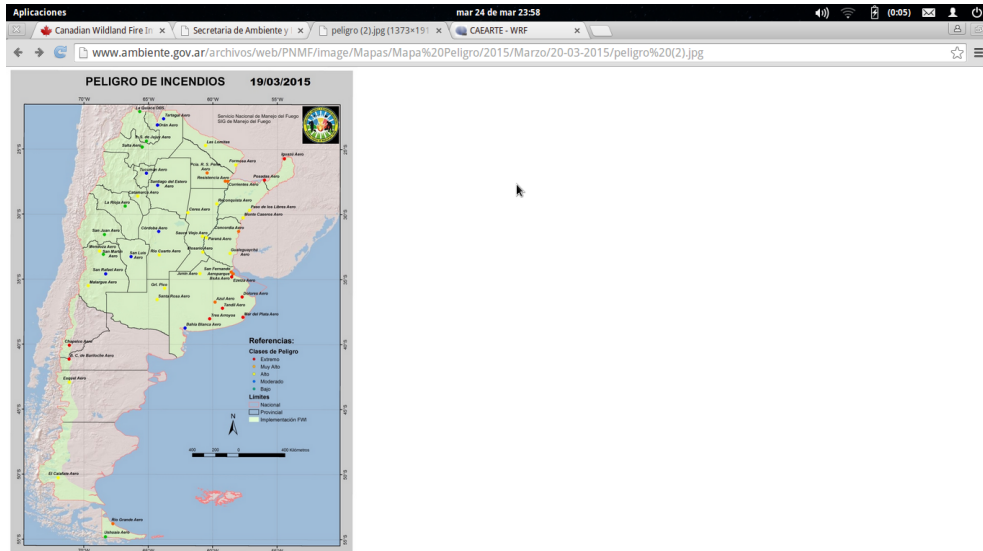


Figura 1.1: Producto publicado por PNMF

Para más información sobre este organismo y su puesta operativa, se puede acceder a la página web oficial (<http://www.ambiente.gov.ar>).

Otro de los sistemas relacionados con la prevención y el manejo de fuego en el plano internacional, es el Canadian Wildland Fire Information System (CWFIS). Es el sistema de información de gestión de incendios basado en el monitoreo de las condiciones de peligro de incendios sobre todo el territorio canadiense. Se recogen de todo el territorio las condiciones climáticas diarias y se utilizan para producir mapas sobre índices meteorológicos de incendios y mapas comportamiento del fuego. Además, se alimenta de información satelital para la detección de incendios.

Al igual que el Plan Nacional del Manejo del Fuego, este sistema implementa el Índice Meteorológico de Peligro de Incendios FWI.

A continuación se expone una imagen de la publicación de los productos generados por el CWFIS.

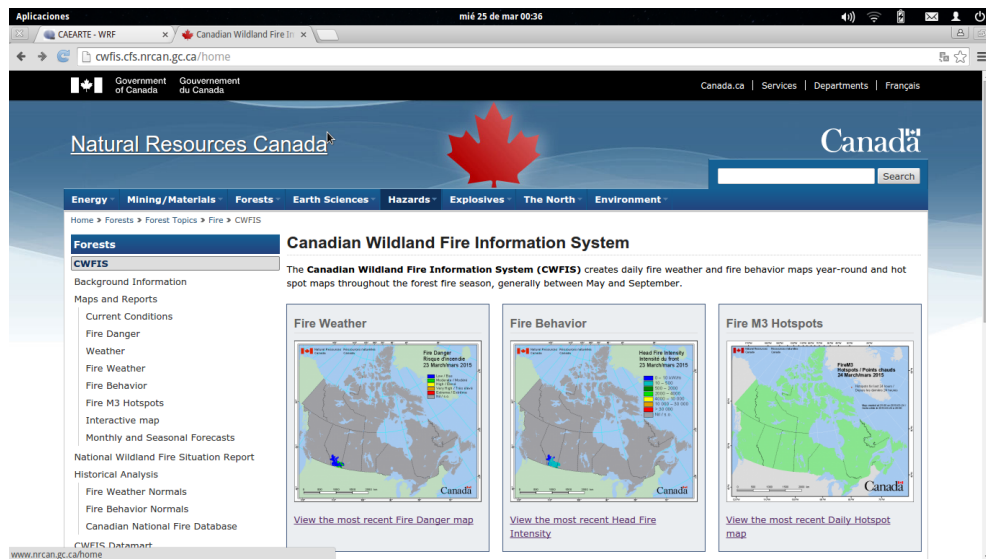


Figura 1.2: Productos publicado por CWIFIS

Para más información sobre la implementación de este sistema, se puede acceder a la página web oficial (cwfis.cfs.nrcan.gc.ca/home).

1.3. Objetivos

El producto básico a desarrollar será un Índice de Peligrosidad Meteorológico, basado en el sistema australiano (McArthur, 1967) el cual se presentará con mayor detalle en capítulo 4, que se corresponde a un mapa raster de 15 km de resolución aproximadamente. Este índice será construido a partir de los valores diarios de las variables: temperatura, humedad relativa, velocidad del viento, y precipitación (24 hs pasadas) estimadas a partir del Modelo Numérico de Predicción Meteorológica (WRF - CAEARTE/FAMAF). El producto se actualizará en forma diaria de manera automática.

Asimismo se realizará la implementación de módulos de meteogramas para el Modelo Numérico de Predicción Meteorológica (WRF-CAEARTE/FAMAF)

1.4. Contexto Inter-institucional

La iniciativa del presente proyecto está impulsada por CONAE-CAEARTE junto a la participación inter-institucional del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), el proyecto BID-PREHISPA de Bienes Públicos Regionales (BPR) donde participan instituciones de Uruguay, Paraguay, Chile, además de la Argentina, y grupos de investigaciones de la Universidad Nacional de Córdoba (UNC).

Potencialmente, el proyecto aspira a involucrar a todas las instituciones relacionadas al sector agro-forestal y de la gestión del Ambiente que requieran de los productos desarrollados. Se espera que los productos sean útiles en el ámbito científico como parte de las

actividades de investigación que requieran el uso de datos sobre el ciclo de ocurrencia abordado por esta propuesta. Además se aspira a que los usuarios participen en forma activa en la validación y el propio desarrollo de productos.

Un esquema que resume esta red de vinculación inter-institucional se presenta a continuación:

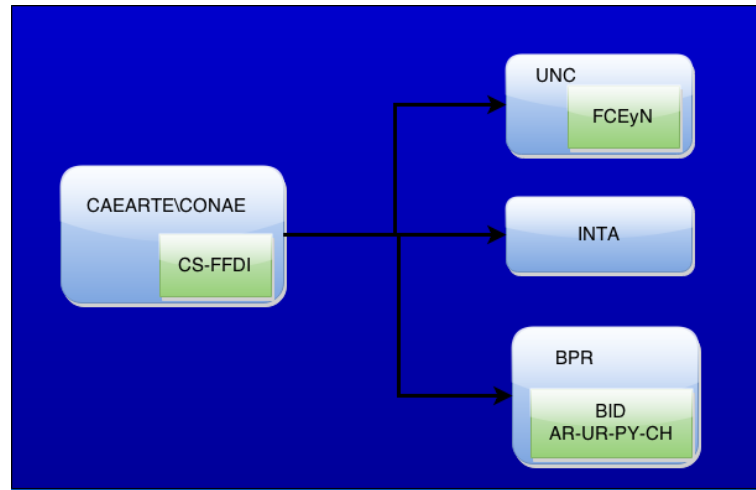


Figura 1.3: Diagrama del contexto interinstitucional del proyecto

1.5. Organización de la Tesis

En el capítulo II, se describe el desarrollo y la implementación del sistema CS-FFDI, donde se definen los requerimientos de usuarios que especifican lo que se espera del sistema en forma general.

Luego se presenta la fase de arquitectura, en la cual se especifica el diseño de la arquitectura y se definen los productos a ser desarrollados. Se presenta la organización y estructura del sistema, contemplando diferentes aspectos funcionales. Se definen sub-sistemas con funcionalidades específicas, que contienen a los módulos y se describen los flujos de información.

Por último se describe el diseño y desarrollo de los productos, y se presenta la metodología desarrollada para cada uno de ellos.

En el capítulo III se aborda la explicación de las características de la implementación del modelo meteorológico Weather Research and Forecasting (WRF) como así también la descripción de sus productos. Además se explica el desarrollo llevado a cabo para la implementación de un Módulo de Meteogramas, entendiéndose este último como una tarea adicional para comprender las salidas producidas por el WRF.

El capítulo IV corresponde a la descripción de modelo Forest Fire Danger Index (FFDI) (McArthur. 1967), donde se explica detalladamente el algoritmo implementado por el sistema CS-FFDI.

En el capítulo V, se presenta el funcionamiento operativo del sistema implementado, describiendo los pasos y requerimientos necesarios para llevar a cabo su instalación. Además se explica la fase de testing y los correspondientes análisis empleados para su validación.

Finalmente el cierre de la tesis corresponde al capítulo VI, donde se presentan las conclusiones del trabajo.

Desarrollo e Implementación del Software

2.1. Requerimientos

Para determinar los requisitos necesarios para el desarrollo de las actividades mencionadas, nos basamos en el Sistema de Alerta y Respuesta Temprana a incendios de vegetación (SARTiv/CONAE) y en la revisión bibliográfica. Mediante un análisis de las fuentes consultadas se determinó que la especificación del modelo Forest Fire Danger Index(FFDI) es el óptimo para la realización del trabajo.

El sistema deberá manejar variables de entradas que representan mapas raster. La representación usual de estas variables es en formato Geotiff las cuales deben poder ser procesadas a fin de extraer los datos incorporados en ellos. Haciendo uso de esta información, el sistema deberá analizarlos y evaluarlos con el fin de reproducir un mapa raster con los índices de peligrosidad de incendio forestal por cada punto del dominio. El dominio de los productos finales deberá abarcar el territorio Argentino (con excepción del territorio antártico), la República Oriental del Uruguay, la República de Chile (Chile Continental) y la República del Paraguay. El sistema en su totalidad deberá ser implementado en un ambiente de código abierto.

2.1.1. Módulos de Entradas

El sistema contará de repositorios encargados de proveer los datos utilizados para los distintos procedimientos. Estos son agrupados en tres directorios identificados según el tipo de dato en información que vuelcan al sistema y la fuente de la cual provienen:

- WRF
- WC
- Historial

Los datos ambientales que requiere el algoritmo son: humedad relativa(%), temperatura (C), velocidad del viento (m/seg), precipitación acumulada de las últimas 24 hs a

las 9 am (mm) y temperatura máxima del día anterior. Además, se usa una variable estática, la lluvia anual (mm). Estos datos de entrada para estimar el índice de riesgo meteorológico de incendio serán obtenidos de las salidas del modelo WRF disponibles en <http://200.16.81.176/wrf/> que se obtienen cada 2 horas y tienen una resolución espacial de aproximadamente 15 km de lado (Lighezzolo, 2014a,b)[28][29]. El dato de precipitación anual podrá obtenerse de la base de datos worldclim (<http://www.worldclim.org/>) que son medias de 50 años y se entregan en varias resoluciones espaciales (aproximadamente 1, 4.5, 9 y 18 km). El índice KBDI se estimará una vez por día usando la precipitación acumulada hasta las 9 am (hora local) del día en cuestión, mientras que el FFDI puede irse actualizando con cada salida del modelo WRF. Es esperable no obstante que el mayor riesgo de incendio por causas meteorológicas ocurra en horas de la tarde, entre las 15 y 17 hs (hora local).

El historial, al contener los datos procesados por el sistema de días anteriores, deberá ser capaz de proveer el los datos de entrada necesarios en el caso de una posible restauración del sistema.

2.1.2. Administración de Datos

Se requerirá en todo caso la verificación de la validez de los datos de entrada. Para tal fin se dispondrá de un componente denominado Data Manager.

Las funcionalidades que le serán requeridas son:

Control de datos

Correspondencia de datos y entradas: Deberá garantizar que los datos ingresados corresponden de manera efectiva a los días solicitados por la aplicación como así también verificar la completitud de ellos.

Control de flujo de información: Determinar y controlar la asignación de datos a los correspondientes módulos de producción. Deberá controlar los flujos de datos hacia los módulos que pronostican el FFDI (FFDI_24hs, FFDI_48hs, FFDI_72hs), garantizando completitud y correctitud de los mismos.

Filtro de información/selección de datos: Como módulo de administración de datos, debe ser capaz de identificar los datos necesarios para las distintas etapas y excluir aquellos no utilizados.

Región de interés: Deberá establecer el dominio de interés en cual se llevarán a cabo todas las operaciones necesarias.

2.1.3. Backup y Reestablecimiento de datos

Control de errores y excepciones: El sistema deberá incorporar la funcionalidad de control de errores y excepciones. Ante un error inesperado el sistema debe ser capaz de recuperar la información vital para los distintos ciclos de producción o finalizar los procesos evitando perdidas de información o sobreescritura de datos.

Copia de seguridad: Por otra parte, el sistema deberá mantener en su repositorio los archivos históricos proveniente de sistemas/fuentes exteriores de no más de 30 días, para

realizar un eficiente uso de memoria y para garantizar un respaldo en el sistema en caso de ser necesario una restauración del mismo a una fecha histórica.

2.1.4. Datos de Salida

El sistema deberá albergar en su repositorio con un identificador de fecha los datos de todas las variables generadas y que intervienen en los correspondientes procesos del mismo. Los formatos requeridos para tales datos son Geotiff, PNG, CSV o TXT. Para los CSV o TXT, los datos deberán ser organizados en tres columnas, las cuales contendrán el dato de latitud y longitud en las dos primeras columnas, y en la columna restante el dato de la variable correspondiente. El sistema debe garantizar la validez de los datos de salida para todos sus formatos. Los mismos estarán disponibles para todas las entidades que integran el proyecto.

2.1.5. Interfaz web

El sistema deberá publicar la cartografía generada vía web, mediante una interfaz intuitiva para el usuario. Las funcionalidades requeridas son:
El sistema deberá visualizar únicamente el pronóstico generado para la variable FFDI en el rango de las 24hs, 48hs y 72hs por separado.
Se permitirá la descarga de los datos de las variables mencionadas anteriormente en sus distintos formatos, como así también, la documentación correspondiente.

Id Requerimientos	Descripción	Deriva de/Comentario
A.0	Manejar Variables de entradas en formato GeoTiff	Representan mapas raster
A.1	Generar un índice de peligrosidad de riesgo de incendio forestal	Representación en mapa raster Se obtienen del WRF World Clim
A.2	Dominio abarcado: Argentina (sin el territorio antártico) (sin el territorio antártico) Chile Uruguay Paraguay	Se toma de la región abarcada por los productos del WRF
A.0.0	Datos de entradas: Humedad relativa (%) Temperatura (C) Intensidad del viento (m/seg) Precipitación últimas 24hs (mm) Temperatura máxima día anterior Lluvia anual (mm)	A.0
A.1.0	Cálculo del KBDI diario y del FFDI basado en los datos de entrada correspondientes a las 15 y 17 hs	A.1
A.1.1	Historial con identificador de fecha	A.1 Se almacenarán todos los datos generados por el sistema
A.1.1.0	Almacenar las salidas en formatos GeoTiff ,PNG, TXT o CSV.	A.1.1 El TXT o CSV debe contar de tres columnas, a saber, latitud, longitud y el datos de la variable
A.1.2	Publicar la cartografía generada via web mediante una interfaz intuitiva para el usuario	A.1
A.1.2.0	Visualizar únicamente el pronóstico de la variable FFDI para la 24hs, 48hs y 72hs	A.1.2
A.1.2.1	Permitir al usuario la descarga de todos los datos publicados	A.1.2

B.0	Verificación de los datos de entradas	Data_Manager
B.0.0	Control de flujo de información	B.0
B.0.1	Filtro de información y selección de datos	B.0
B.0.2	Región de interés	B.0 y A.0
C.0	Backup y Reestablecimiento de datos	Almacenar los datos vitales del sistema para poder reestaurarlo si es necesario
C.0.0	Control de errores y excepciones	C.0
C.0.1	Copia de seguridad	C.0

Cuadro 2.1: Resumen Requerimientos de Usuario

2.2. Arquitectura

El sistema propuesto debe operar dentro del segmento de servicios al usuario de CONAE (CUSS), el cual posee una infraestructura adaptada a la integración de procesos externos. De este modo, SARTiv es una infraestructura independiente que se integra a una cadena de procesos existentes dentro del CUSS, el cual forma parte de un sistema complejo de operaciones denominado CONAE Ground Segment (CGS). El sistema CS-FFDI entonces, debe operar dentro de los estándares de CONAE, emplear la información procesada en el CGS, y comunicarse con una interfaz de usuarios.

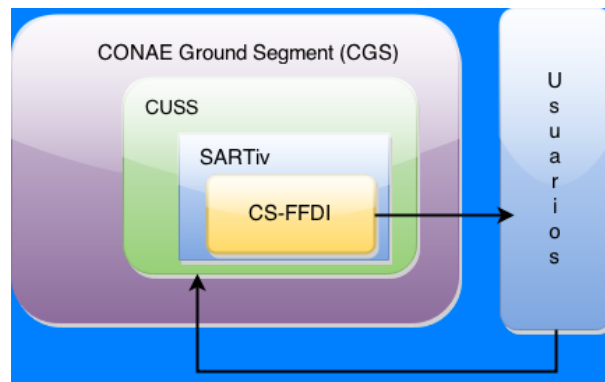


Figura 2.4: Operación del sistema CS-FFDI dentro del sistema de SARTiv/CONAE.

La configuración del sistema se propone de acuerdo a un esquema distribuido, a partir de diferentes sistemas y nodos de procesamiento con funciones específicas.

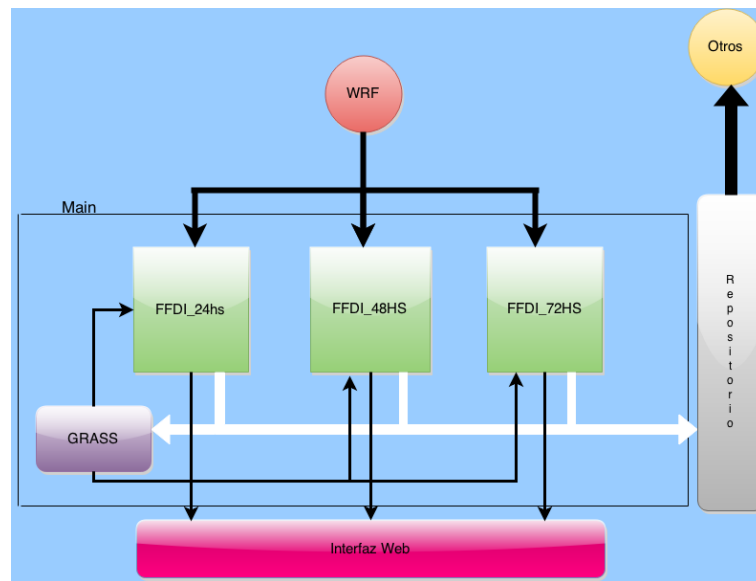


Figura 2.5: Arquitectura de sistema CS-FFDI

A continuación se presentan los elementos que componen al sistema junto a una descripción de las funcionalidades específicas:

WRF: es el sistema externo responsable de suministrar los datos ambientales pronosticados para las próximas 72hs que requiere el algoritmo (humedad relativa (%), temperatura (C), velocidad del viento (km/h), precipitación acumulada de las últimas 24 hs a las 9 am (mm) y temperatura máxima del día anterior).

Repositorio de Datos: es el directorio de almacenamiento de los datos de entrada, como así también, de los datos de salidas generados por cada proceso del sistema.

Main: es el módulo principal encargado de ejecutar en forma automática las tareas de procesamiento de los módulos FFDI_24hs, FFDI_48hs, FFDI_72s

FFDI_24hs: el objetivo principal de este módulo es generar datos sobre el índice de peligrosidad de incendio forestal correspondiente al pronóstico provisto de las próximas 24hs, para todo el dominio especificado en los requerimientos, implementando el algoritmo FFDI (McArthur, 1967).

FFDI_48hs: el objetivo principal de este módulo es generar datos sobre el índice de peligrosidad de incendio forestal correspondiente al pronóstico provisto de las próximas 48hs, para todo el dominio especificado en los requerimientos, implementando el algoritmo FFDI (McArthur, 1967).

FFDI_72hs: el objetivo principal de este módulo es generar datos sobre el índice de peligrosidad de incendio forestal correspondiente al pronóstico provisto de las próximas 72hs, para todo el dominio especificado en los requerimientos, implementando el algoritmo FFDI (McArthur, 1967).

GRASS GIS: Es el sistema responsable de automatizar los procesos que intervienen en los módulos nombrados anteriormente, algunas de las tareas de dicha automatización consiste en:

- Importar y almacenar los datos de entrada que requiere el algoritmo en la locación y mapset correspondiente
- Crear mapas raster y hacer cálculos entre ellos.
- Exportar resultados en distintos formatos (Geotif, CSV, PNG)

Interfaz Web: Es el módulo encargado de establecer una interfaz intuitiva para el usuario y de proveer todas las funcionalidades requeridas

Otros: es el elemento que hace referencia a todos los organismos que tendrán acceso a los datos generados por el sistema.

A continuación se describen los componentes que integran a los módulos FFDI_24hs, FFDI_48hs, y FFDI_72hs:

Data_Manager: es el componente responsable de la administración de datos. Realiza las tareas relacionadas al control de datos como: la correspondencia de datos y entradas, el control de flujo de información, el filtrado de información/selección de datos, el establecimiento de la región de interés, y la importación de todos los datos de entrada como mapas rasters (con resolución de 15km) al mapset de GRASS como así también almacenar dicha información en el repositorio de datos.

Peff: es el componente responsable generar el mapa raster (con resolución de 15km) asociado a la lluvia efectiva en mm, tomando como datos de entrada la lluvia del día anterior.

Tal salida es almacenada tanto en el mapset de GRASS como así también en el historial del repositorio de datos.

ET: este componente se encarga de generar el mapa raster (con resolución de 15km) asociado a la evapotranspiración, en función de la lluvia promedio anual, el KBDI y la temperatura máxima del día anterior anterior.

Tal salida es almacenada tanto en el mapset de GRASS como así también en el historial del repositorio de datos.

KBDI: es el componente responsable de generar el mapa raster (con resolución de 15km) asociado al índice de sequía KBDI, en función de las salidas de los dos sub-módulos anteriores.

Tal salida es almacenada tanto en el mapset de GRASS como así también en el historial del repositorio de datos.

DF: este componente genera un mapa raster (con resolución de 15km) del factor de sequía tomando como datos de entrada el KBDI, la precipitación acumulada en las últimas 24 hs, y el número de días desde la última precipitación.

Tal salida es almacenada tanto en el mapset de GRASS como así también en el historial del repositorio de datos.

Filtro: es el sub-módulo que genera una mapa raster (con resolución de 15km) asociado a la cobertura del suelo (se obtiene del archivo GeoTiff provisto por el proyecto SERENA) que se tendrá en cuenta como máscara para el cálculo del FFDI.

Las coberturas de suelo que no se tendrán en cuenta son las siguientes:

- Hielo
- Suelo desnudo
- Salina
- Agua
- Cuerpos de agua
- Ciudades

Tal salida es almacenada tanto en el mapset de GRASS como así también en el historial del repositorio de datos.

FFDI: es el componente que genera un mapa raster (con resolución de 15km) del índice de peligrosidad de incendio forestal con la máscara de cobertura de suelo, en función de la salida del módulos anteriores y de las variables ambientales de: viento(km/s), temperatura(C) y humedad relativa(%).

Tal salida es almacenada tanto en el mapset de GRASS como así también en el historial del repositorio de datos.

RF: es el componente que se encarga de remover la máscara generada por el sub-módulo Filtro para que no afecte en los cálculos de las salidas correspondientes a los sub-módulos

Peff, ET, KBDI y DF en su próxima ejecución, es decir, elimina el mapa raster creado en el mapset de GRASS.

Data_Copy: Es el componente que copia todos los datos producidos por cada uno de los módulos anteriores, al directorio correspondiente a la interfaz web, para que éste pueda cumplir con sus funcionalidades.

Data_Destroyer: Este componente pertenece únicamente al módulo FFDI_72hs, es el responsable de remover los datos históricos de entradas de mas de 30 días guardados en el repositorio.

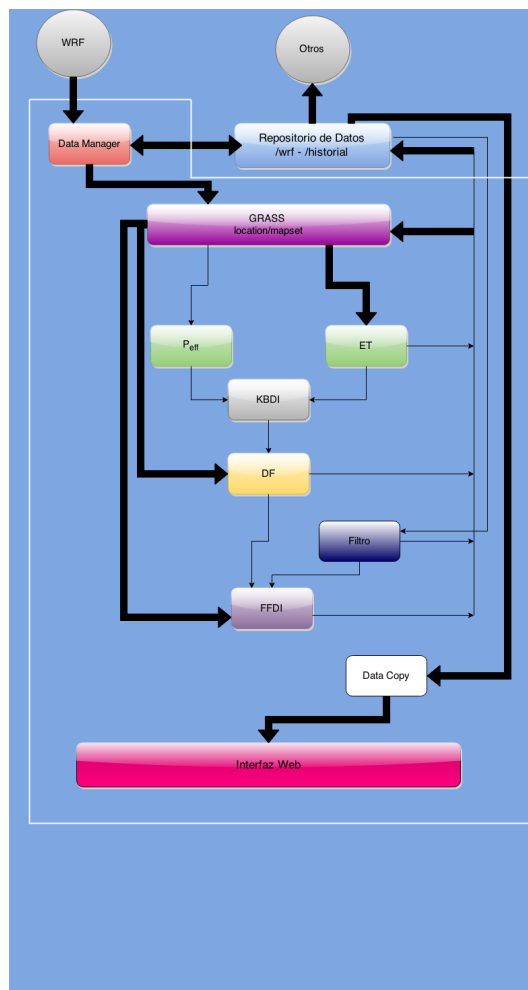


Figura 2.6: Arquitectura del los módulos FFDI_24hs, FFDI_48hs, FFDI_72hs

2.3. Diseño

Para la realización de un diseño más detallado, se determinaron los correspondientes casos de uso y diagramas de clases.

2.3.1. Casos de Uso

Nombre: Mostrar cartografía del FFDI_24hs
Descripción: Permite visualizar la cartografía del índice de peligrosidad de incendio forestal generada por el módulo FFDI_24hs.
Actor: Usuario
Flujo Normal: El actor pulsa el botón para ver las cartografías. El sistema determina la fecha de la petición del actor. El sistema verifica la existencia de tales datos, y automáticamente visualiza la cartografía del FFDI y FFDI reclasificado.
Flujo Alternativo: En caso de no existir tales datos, el sistema le envía un mensaje de error al actor.

Cuadro 2.2: Caso de uso Nro: 1

Nombre: Mostrar cartografía del FFDI_48hs
Descripción: Permite visualizar la cartografía del índice de peligrosidad de incendio forestal generada por el módulo FFDI_48hs.
Actor: Usuario
Flujo Normal: El actor pulsa el botón para ver las cartografías. El sistema determina la fecha de la petición del actor. El sistema verifica la existencia de tales datos, y automáticamente visualiza la cartografía del FFDI y FFDI reclasificado.
Flujo Alternativo: En caso de no existir tales datos, el sistema le envía un mensaje de error al actor.

Cuadro 2.3: Caso de uso Nro: 2

Nombre: Mostrar cartografía del FFDI_72hs
Descripción: Permite visualizar la cartografía del índice de peligrosidad de incendio forestal generada por el módulo FFDI_72hs.
Actor: Usuario
Flujo Normal: El actor pulsa el botón para ver las cartografías. El sistema determina la fecha de la petición del actor. El sistema verifica la existencia de tales datos, y automáticamente visualiza la cartografía del FFDI y FFDI reclasificado.
Flujo Alternativo: En caso de no existir tales datos, el sistema le envía un mensaje de error al actor.

Cuadro 2.4: Caso de uso Nro: 3

Nombre: Descargar datos
Descripción: Permite descargar las cartografías del índice de peligrosidad de incendio forestal en los formatos GeoTIF, PNG y CSV.
Actor: Usuario
Flujo Normal: El actor pulsa el botón de descarga. El sistema determina la fecha de la petición del actor. El sistema verifica la existencia de tales datos, y automáticamente descarga la cartografía del FFDI y FFDI reclasificado pronosticados para las 24hs , 48hs y 72hs en todos los formatos en el que se han generado.
Flujo Alternativo: En caso de no existir tales datos, el sistema le envía un mensaje de error al actor.

Cuadro 2.5: Caso de uso Nro: 4

2.3.2. Diagrama de Clases

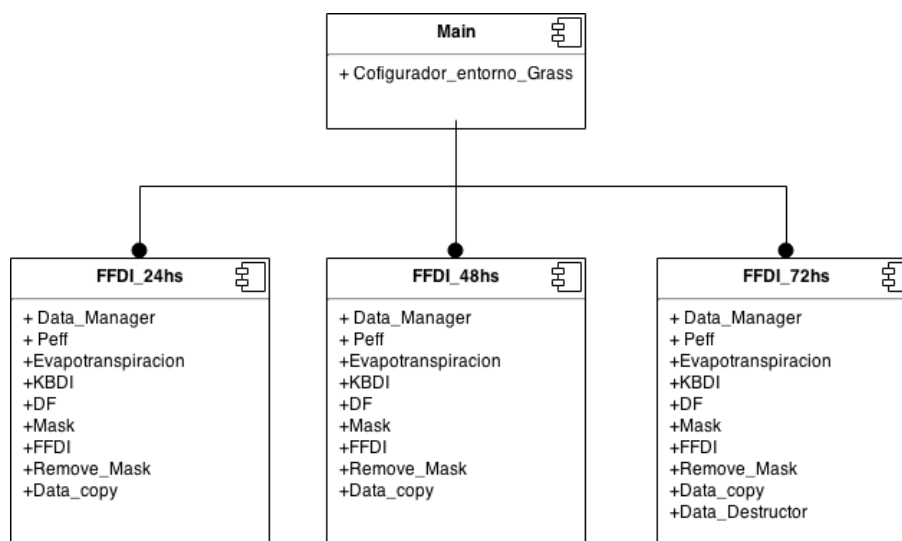


Figura 2.7: Diagrama de clases del sistema CS-FFDI

Inputs
String: Ruta del repositorio donde se almacenarán los datos de entradas y salidas del sistema.
[1,2,3]: opción que determina el flujo de datos para los módulos FFDI_24hs, FFDI_48hs y FFDI_72hs respectivamente.
Outputs
Mapa raster: Todos los datos de entradas que necesita el sistema se guardarán en el mapset de GRASS.
Archivos: Todos los datos de entradas que necesita el sistema se guardarán en el repositorio de datos en sus formatos originales.

Cuadro 2.6: Epecificación del Data_Manager

Inputs
Mapas raster: Precipitación del día anterior y del día corriente.
Outputs
Mapa raster: Lluvia efectiva que se almacenará en el mapset de GRASS

Cuadro 2.7: Epecificación del P_{eff}

Inputs
Mapas raster: KBDI y temperatura máxima del día anterior, y lluvia promedio anual. String: Ruta en donde se guardarán las salidas del proceso. Time: Fecha de la ejecución del sistema.
Outputs
Mapa raster: Evapotranspiración que se almacenará en el mapset de GRASS. Archivos: Evapotranspiración en formatos GeoTIFF, PNG y CSV que se guardarán en el repositorio.

Cuadro 2.8: Epecificación del Evapotranspiración

Inputs
Mapas raster: KBDI del día anterior, lluvia efectiva y evapotranspiración. String: Ruta en donde se guardarán las salidas del proceso. Time: Fecha de la ejecución del sistema.
Outputs
Mapa raster: KBDI que se almacenará en el mapset de GRASS. Archivos: KBDI en formatos GeoTIFF, PNG y CSV que se guardarán en el repositorio.

Cuadro 2.9: Epecificación del KBDI

Inputs
Mapas raster: KBDI del día corriente. String: Ruta en donde se guardarán las salidas del proceso. Time: Fecha de la ejecución del sistema.
Outputs
Mapa raster: Factor de sequía que se almacenará en el mapset de GRASS. Archivos: Factor de sequía en formatos GeoTIFF, PNG y CSV que se guardarán en el repositorio.

Cuadro 2.10: Epecificación del DF

Inputs
String: Ruta en donde se encuentra el archivo GeoTIFF perteneciente a la cobertura del suelo
Outputs
Mapa raster: Máscara de cobertura de suelo que se almacenará en el mapset de GRASS

Cuadro 2.11: Epecificación del Mask

Inputs
Mapas raster: Factor de sequía , humedad relativa, intensidad del viento y temperatura del día corriente.
String: Ruta en donde se guardarán las salidas del proceso.
String: Ruta en donde se encuentra el archivo . psmap que contiene las instrucciones para graficar la cartografía generada por el proceso en formato EPS.
Time: Fecha de la ejecución del sistema.
Outputs
Mapa raster: FFDI y FFDI reclasificado que se almacenará en el mapset de GRASS.
Archivos: FFDI y FFDI reclasificado en formatos GeoTIFF, PNG y CSV que se guardarán en el repositorio.

Cuadro 2.12: Epecificación del FFDI

Inputs
No requiere de entradas
Outputs
No produce salidas. Remueve el mapa raster de cobertura de suelo del mapset de GRASS

Cuadro 2.13: Epecificación del Remove_Mask

Inputs
String: Ruta donde se encuentran todos los datos generados por el sistema
String: Ruta en donde se almacenarán todos los datos del sistema para ser accedido por los procedimiento correspondientes a la interfaz web
Outputs
No produce salidas.

Cuadro 2.14: Epecificación del Data_Copy

Inputs
String: Ruta en donde se almacenan los datos de entradas
Time: Fecha correspondiente al archivo que contiene los datos de entradas de hace 30 días.
Outputs
No produce salidas.

Cuadro 2.15: Epecificación del Data_Destructor

2.4. Desarrollo

Es destacable mencionar que la implementación de los módulos y funciones que conforman al sistema se codificaron utilizando el lenguaje Python, esto se debe al gran potencial del mismo y sobre todo porque las mayoría de las funcionalidades se implementaron utilizando los comandos que nos provee GRASS GIS por medio de su script de Python llamado `grass.script`. En la sección 2.4.2 se hablará con mayor detalle de las características de este software, considerado vital para cada proceso del sistema CS-FFDI.

2.4.1. Implementaciones y resultados

En esta sección se explicarán las implementaciones y resultados de los componentes más importantes del sistema.

Data_Manager

Como mencionamos en los capítulos anteriores, Data_Manager es encargado de administración de los datos en general.

La funcionalidad de control de datos como lo es la **correspondencia de datos y entradas**, se implementaron utilizando la función llamada **check_folder**, la cual verifica que los datos de entradas pertenecientes al WRF, esten actualizados, es decir, pertenezcan al día en cuestión de acuerdo al pronóstico que se desea realizar y que existan cada uno de ellos. En caso de que no se dieran estas condiciones, el sistema no se ejecuta.

Por otro lado, el **control de flujo de información** se llevo cabo por medio, de un parámetro de entrada que toma el Data_Manager del tipo [1,2,3], el cual tiene como finalidad indicar que módulo se esta ejecutando, estos valores hacen referencia a los módulos FFDI_24hs, FFDI_48hs y FFDI_72hs respectivamente. Es decir, según el valor tomado por el parámetro se determinan que datos de entradas se importarán al sistema y a que directorio corresponden el almacenamiento de los datos generados por cada uno de ellos. Además los **filtros de información** que se determinaron, fueron introducidos en el código de este componente por medio máscara, las cuales se importaron al sistema, utilizando los correspondientes comando de GRASS.

Por último, la **región de interés** también se determinó utilizando la región aportada por cualquiera de los mapas raster de importados desde el WRF/CONAE, ya que aportaban el dominio y resolución requerida. Tal defenición de región se llevó cabo por medio de

comandos de GRASS.

A continuación se explica el pseudocódigo implementado con sus respectivos comentarios:

```
1 #Administrador de datos
2 Data_Manager(ruta_del_repositorio , option):
3   try:
4     #Se establece la fecha del pronostico deseado
5     date=establecer_fecha()
6
7     #Se crea el directorio donde se almacenaran los datos procesados
8     if (option==1):
9       #El directorio estara ubicado en la carpeta historial del repositorio
10      de datos con el nombre de la fecha
11      crear_directorio(ruta_del_repositorio+"historial/"+date)
12
13     else if (option==2):
14       #El directorio estara ubicado en la carpeta historial del repositorio
15       de datos con el nombre de "48hs"
16       crear_directorio(ruta_del_repositorio+"historial/48hs")
17
18     else if (option==3):
19       #El directorio estara ubicado en la carpeta historial del repositorio
20       de datos con el nombre de la "72hs"
21       crear_directorio(ruta_del_repositorio+"historial/72hs")
22
23     else:
24       #Como la opcion no existe se sale del sistema
25       salir_sistema()
26
27
28     #Se verifica la completitud y correctitud de los datos de entrada
29     check_folder(ruta_datos_wrf)
30
31     #Se importan los datos del wrf al repositorio
32
33     importar_datos(ruta_del_repositorio)
34
35     #Se importan los datos de entradas provenientes del WRF al mapset de
36     GRASS
37     if (option==1):
38       importar_FFDI24()
39
40     else if (option==2):
41       importar_FFDI48()
42
43     else:
44       importar_FFDI72()
45
46
47     #Se establece la mascara de sudamerica
48     mascara_sudamerica()
49
50     #Se setea el KBDI con el del dia anterior
51     set_KBDI()
```

```

48
49
50     #Se determina la siginificancia de cada lluvia de los ultimos 20 dias
51     for i in range(0,21):
52         calcular_significancia_lluvia(i)
53
54     except:
55         #Se imprime por pantalla un error
56         imprimir_error()

```

Peff

Es el proceso encargado de calcular la lluvia efectiva. Su funcionalidad es la misma para cada módulo.

A continuación se expone el código implementado de acuerdo al algoritmo propuesto por el modelo FFDI:

```

1 # Peff (Effective precipitation)
2 def preff(prec_acc_24_0, prec_acc_24_1):
3     try:
4         print "preff module\n"
5         #Calculo del mapa raster left
6         grass.run_command('r.mapcalc', expression="left = max((5.08 -"+
7             prec_acc_24_0+") ,0.0)", overwrite=True)
8
9         #Calculo del mapa raster p_eff
10        grass.run_command('r.mapcalc', expression="p_eff = if (" +prec_acc_24_1+"
11            >= 5.08, "+prec_acc_24_0+", if (" +prec_acc_24_1+"> 0.0 &&" +
12            prec_acc_24_0+"< 5.08, "+prec_acc_24_0+"- left , max(" +prec_acc_24_0+"
13            -5.08,0)))", overwrite=True)
14
15    except:
16        print "ERROR: Module preff\n"

```

Evapotranspiración

Es el proceso encargado de calcular la evapotranspiración. Su funcionalidad es la misma para cada módulo.

A continuación se expone el código implementado de acuerdo al algoritmo propuesto por el modelo FFDI junto con el resultado obtenido del día 17/03/2015:

```

1 # ET (evapotranspiration)
2 def evapotranspiracion(path, date, kbdi_t_1, tmax, mean_annual_rainfall):
3     try:
4         print "evapotranspiracion module\n"
5         #creamos una carpeta que contendra los datos de et
6         os.mkdir(path+"/et")
7         path = path+"/et"
8
9

```

```

10
11 #Calculo del mapa raster et_t
12 grass.run_command('r.mapcalc', expression="et_num_parte1=(203.2-"+
    kbdi_t_1+")", overwrite=True)
13 grass.run_command('r.mapcalc', expression="et_num_parte2 = 0.968*exp
    (0.0875*"+tmax+"+1.5552)", overwrite=True)
14 grass.run_command('r.mapcalc', expression="et_num = (et_num_parte1*
    et_num_parte2)-8.3", overwrite=True)
15 grass.run_command('r.mapcalc', expression="et_den = 1.0 + (10.88*exp
    (-0.00173*"+mean_annual_rainfall+"))", overwrite=True)
16 grass.run_command('r.mapcalc', expression="et_t = (et_num/et_den)*0.001
    ", overwrite=True)
17
18 #Guardar los distintos formatos de salida de et obtenido en el
    historial
19 export_to_file('et_t',path+"/et_"+str(date),1,"")
20 except:
21 print "ERROR: evapotranspiracion module\n"

```

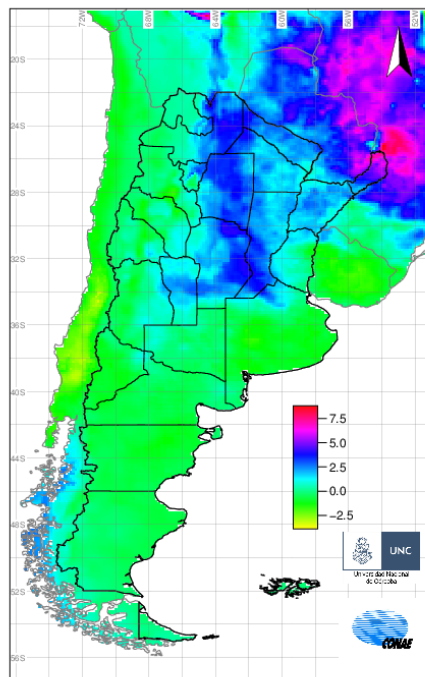


Figura 2.8: Evapotranspiración del día 17/03/2015

KBDI

Es el proceso encargado de calcular el índice de sequedad del suelo KBDI. Su funcionalidad es la misma para cada módulo.

A continuación se expone el código implementado de acuerdo al algoritmo propuesto por el modelo FFDI junto con el resultado obtenido del día 17/03/2015:

```
1 # KBDI
2 def kbdi(path, date, kbdi_t_1, p_eff, et_t, kbdi_t):
3     try:
4         print "kbdi module\n"
5         #creamos una carpeta que contendra los datos del kbdi
6         os.mkdir(path+"/kbdi")
7         path = path+"/kbdi"
8
9         #Calculo del mapa raster kbdi_t
10        grass.run_command('r.mapcalc', expression=kbdi_t+"=max((( "+kbdi_t_1+"-"
11            +p_eff+"))+ "+et_t+"), 0.0)", overwrite=True)
12
13        #guardar los distintos formatos de salida le KBDI obtenido en el
14        historial
15        export_to_file('kbdi_t', path+"/kbdi_"+str(date), 1, "")
16    except:
17        print "ERROR: Module kbdi\n"
```

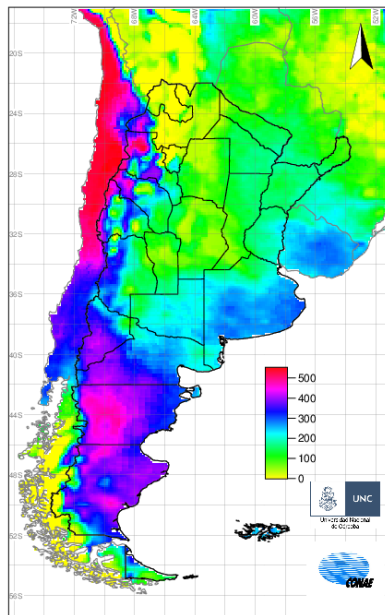


Figura 2.9: KBDI del día 17/03/2015

DF

Es el proceso encargado de calcular el factor de sequía. Su funcionalidad es la misma para cada módulo.

A continuación se expone el código implementado de acuerdo al algoritmo propuesto por el modelo FFDI junto con el resultado obtenido del día 17/03/2015:

```
1 #DF (factor de sequia)
2 def df(path, date, kbdi_t):
3
4     try:
5         print "df module\n"
6         #creamos una carpeta que contendra los datos de df
7         os.mkdir(path+"/df")
8         path = path+"/df"
9
10        #Calculo de los mapas raster del DF para cada uno de los 20 dias
11        anteriores
12        for i in range(0,21):
13            # "y_n" representa la significancia de lluvia
14            y_n="y_"+str(i)
15            df_t_n = "df_t_"+str(i)
16            grass.run_command('r.mapcalc', expression="parte1_df = 10.5*(1.0-exp
17            (-("kbdi_t"+30.0)/40.0))", overwrite=True)
18            grass.run_command('r.mapcalc', expression="parte2_df = ("y_n"+42.0)
19            /(pow("y_n",2)+3.0*"y_n"+42.0)", overwrite=True)
20            grass.run_command('r.mapcalc', expression=df_t_n + "= parte1_df*
21            parte2_df", overwrite=True)
22
23        #Calculo del mapa raster df_t
24        maps=grass.read_command('g.list', pattern='df_t_*', type='rast').
25        splitlines()
26        grass.run_command('r.series', input= maps , method='minimum', output='
27        df', overwrite=True)
28        grass.run_command('r.mapcalc', expression="df_t = min(df,10.0)",
29        overwrite=True)
30
31        #guardar los distintos formatos de salida del DF obtenido en el
32        historial
33        export_to_file('df_t', path+"/df_"+str(date), 1, "")
34
35    except:
36        print "ERROR: df module \n"
```

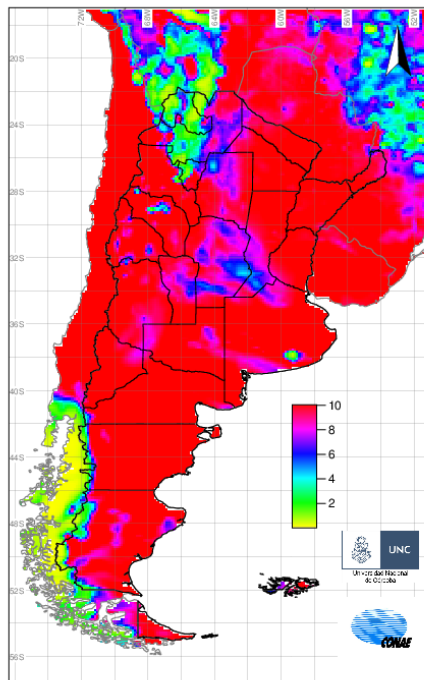


Figura 2.10: Factor de sequía del día 17/03/2015

Mask

Es el proceso encargado de crear la máscara de cobertura del suelo. Su funcionalidad es la misma para cada módulo.

A continuación se expone el código:

```

1 #Procedimiento que enmascar los resultado procesados con la cobertura de
  suelo
2 def mask(path):
3   #Mascara de cobertura del suelo
4   #Checkeo de existencia del archivo
5   try:
6     print "mask\n"
7     assert(os.path.exists(path+"serena_lat_lon.tif"))
8
9   #Importacion del mapa raster de cobertura de suelo de latinoamerica
10  grass.run_command('r.in.gdal', input=path+"serena_lat_lon.tif", output=
    'serena_lat_lon', overwrite=True)
11
12
13
14

```

```

15 #Creacion del mapa raster de cobertura de suelo de interes
16 grass.run_command('r.mapcalc', overwrite=True, expression="serena_mask=
    if(serena_lat_lon == 16 || serena_lat_lon == 17 || serena_lat_lon ==
    18 || serena_lat_lon == 19 || serena_lat_lon == 22 || serena_lat_lon
    == 23, null(), 1)")
17
18 #Establecimiento de mascara
19 grass.run_command('r.mask', rast='serena_mask', overwrite=True)
20 except:
21 print "ERROR: function mask\n"

```

FFDI

Es el proceso encargado de calcular el índice de peligrosidad de incendio forestal. Su funcionalidad es la misma para cada módulo.

A continuación se expone el código implementado de acuerdo al algoritmo propuesto por el modelo FFDI junto con el resultado obtenido del día 17/03/2015:

```

1 #FFDI
2 def ffdi(path, path2, date, df_t, rh, temp, ws):
3
4     try:
5         print "ffdi module\n"
6         #Creamos una carpeta que contendra los datos del ffdi
7         os.mkdir(path2+"/ffdi")
8         path2 = path2+"/ffdi"
9
10        #Calculo del mapa raster ffdi_t
11        grass.run_command('r.mapcalc', expression="partel_ffdi = (-0.450+0.978*
            log("+df_t+")-0.0345*"+rh+"+0.038*"+temp+"+0.0234*"+ws+")",
            overwrite=True)
12        grass.run_command('r.mapcalc', expression="ffdi_t = 2.0*exp(partel_ffdi)
            ", overwrite=True)
13
14        #Cambiamos la paleta de colores
15        grass.run_command('r.colors', map='ffdi_t', rules=path+'color.csv')
16
17        #guardar los distintos formatos de salida del FFDI obtenido en el
            historial
18        export_to_file('ffdi_t', path2+"/ffdi_"+str(date), 2, path+"ffdi.psm")
19
20        # Calculamos el mapa raster de la reclasificacion
21        grass.run_command('r.recode', overwrite=True, input='ffdi_t', output='
            ffdi_t_recode', rules=path+'reclasificacion.csv')
22        grass.run_command('r.reclass', overwrite=True, input='ffdi_t_recode',
            output='ffdi_t_reclass', rules=path+'reclass_es.csv')
23
24        #Cambiamos la palea de colores
25        grass.run_command('r.colors', map='ffdi_t_reclass', rules=path+'color2.
            csv')
26
27        #guardar los distintos formatos de salida del RECLASS obtenido en el
            historial

```

```
28     export_to_file('ffdi_t_reclass', path2+"/ffdi_reclass_"+str(date), 2, path
29         +"ffdi_reclass.psmap")
30 except:
31     print "ERROR: ffdi module\n"
```

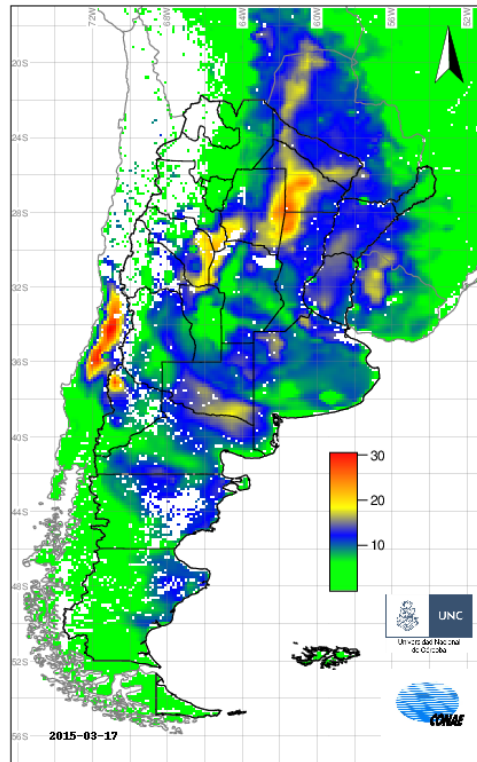


Figura 2.11: Índice de peligrosidad de incendio forestal 17/03/2015

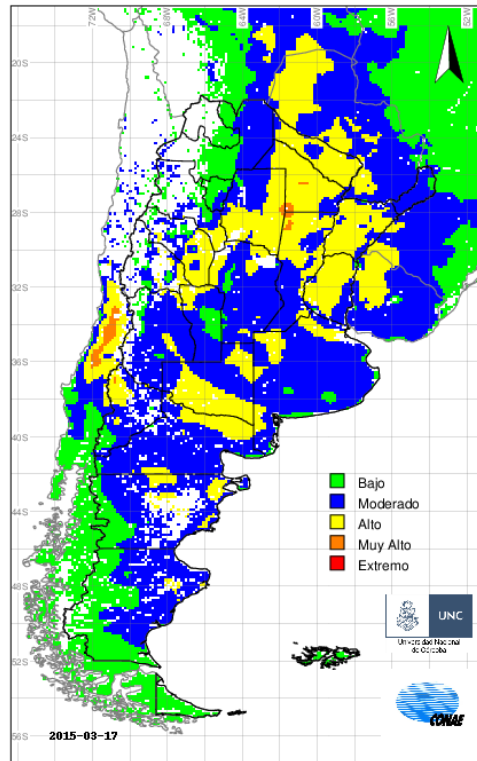


Figura 2.12: Índice de peligrosidad de incendio forestal reclasificado 17/03/2015

Remove_Mask

Es el proceso encargado de remover la máscara de cobertura del suelo. Su funcionalidad es la misma para cada módulo.

A continuación se expone el código:

```

1
2 #Procedimiento que remueve la mascara de cobertura de suelo
3 def remove_mask():
4     try:
5         print "remove_mask\n"
6         grass.run_command('r.mask', rast='serena_mask', flags='r')
7     except:
8         print "ERROR: function remove_mask\n"

```

Main

Es el módulo principal encargado de establecer el entorno de trabajo con el software GRASS y de ejecutar los módulos pronosticadores del riesgo de incendio (FFDI_24hs, FFDI_48hs, FFDI_72hs).

A continuación se expone el código:

```
1
2 #Codigo que estblece el entorno de trabajo con GRASS#
3
4     ... CODIGO....
5
6 def main():
7
8     #Se ejecuta el modulo FFDI_24hs
9     try:
10         ok1 = os.system("python ffdi_24.py")
11         assert(ok1==0)
12     except:
13         print "ERROR: Running ffdi_24\n"+chr(27)
14
15     #Se ejecuta el modulo FFDI_48hs
16     try:
17         ok2 = os.system("python ffdi_48.py")
18         assert(ok2==0)
19     except:
20         print "ERROR: Running ffdi_48\n"+chr(27)
21
22     #Se ejecuta el modulo FFDI_72hs
23     try:
24         ok3 = os.system("python ffdi_72.py")
25         assert(ok3==0)
26     except:
27         print "ERROR: Running ffdi_72\n"+chr(27)
28
29
30
31 if __name__ == "__main__":
32     main()
```

Notas:

- Los datos de lluvia anual, se extraen del world clim (<http://www.worldclim.org/>) en formato Geotiff y se almacena en el repositorio. En la primera ejecución del sistema se importan por unica vez al mapset de GRASS con la misma resolución que los datos de entradas provenientes del WRF/CONAE.
- Se puede observar que los valores de los mapas raster se sobrescriben en cada ejecución.
- Cabe destacar, que para el manejo de potenciales errores se utilizaron la sentencias **try: [comando] except: [comando]** con el motivo de restaurar si es necesarios los valores del KBDI. Esto se debe a que el valor del KBDI actual depende del valor del KBDI del día anterior.
- Para la exportación de los datos de salidas del sistemas se empleo la función **export_to_file**. Esta función toma como parámetros de entrada(en el siguiente orden) el nombre del mapa raster a exportar (tipo string), la ruta en dónde se almacenará los distintos formatos exportados (tipo string), una opción para determinar si se utiliza el archivo **.psmap** (tipo [1,2]), y la ruta en donde se encuentra dicho archivo (tipo string).
Los formatos en los que se exportan estos mapas son: GeoTiff, PNG y CSV, también EPS si es que se utiliza el archivo **.psmap**.
- En el módulo **Main** se puede apreciar que el flujo de trabajo es dependiente, pues si el pronosticador de la 24hs anterior finaliza su proceso con algún error entonces el pronosticador que le sigue en el flujo de trabajo no debe ejecutarse, ya que éste necesita del valor del KBDI del día anterior.

Interfaz Web

El sistema al ser un subproducto del WRF, publicará sus datos en la pagina web <http://200.16.81.176/wrf/>.

La siguiente figura expone la interfaz de usuario desarrollada:

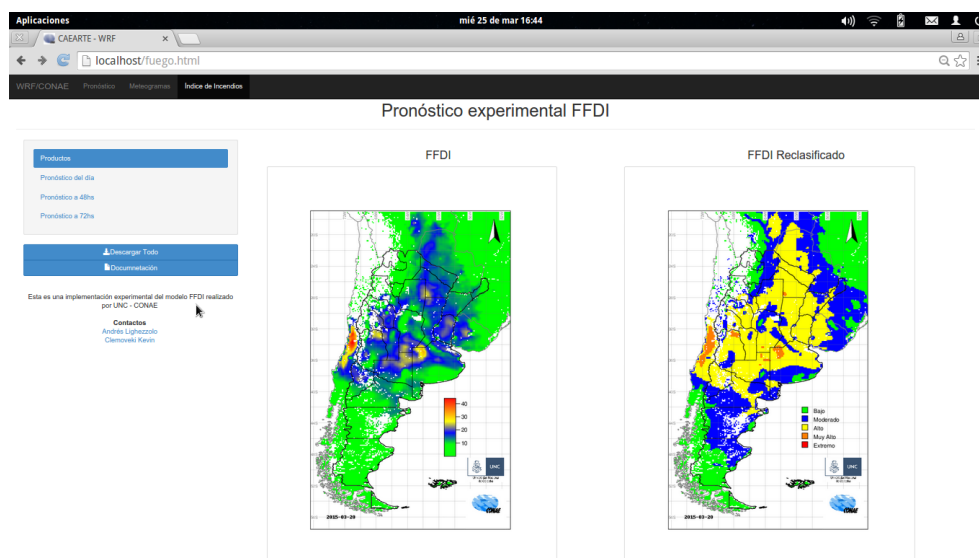


Figura 2.13: Interfaz web del sistema

2.4.2. GRASS GIS

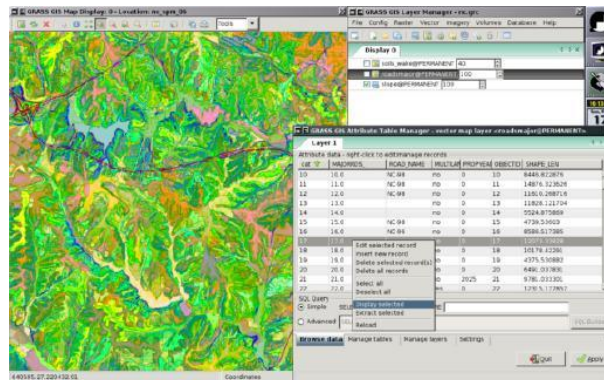
Información General

GRASS (acrónimo inglés de Geographic Resources Analysis Support System) es un Sistema de Información Geográfica (SIG o GIS acrónimo en inglés) que se utiliza para la gestión de datos, procesamiento de imágenes, producción de gráficos, modelado espacial y visualización de muchos tipos de datos. Es un software bajo licencia GNU GPL (software libre). En sus inicios, en 1982, el software fue desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros del Laboratorio de Investigación de Ingeniería de la Construcción del Ejército de los Estados Unidos (USA-CERL) como herramienta para la supervisión y gestión medioambiental de los territorios bajo administración del Departamento de Defensa al no encontrar ningún GIS en el mercado que satisficiera estas necesidades. En 1991 se pone a disposición pública a través de Internet. Su popularidad se incrementa en universidades, empresas y agencias gubernamentales. En 1997, ante el anuncio de USA-CERL GRASS de que dejaría de dar soporte al programa, la Universidad de Baylor se hace cargo de su desarrollo. A partir de esta fecha aumenta su aceptación dentro del mundo académico. El 26 de octubre de 1999 con la versión 5.0 se libera el código del programa bajo licencia GNU GPL. GRASS era uno de los primeros ocho proyectos de la Fundación OSGeo. En 2008 oficialmente se graduó de la fase de incubación.

Características Generales

GRASS GIS contiene más de 350 módulos para hacer mapas e imágenes; manipular raster y vectores; procesar imágenes de datos multiespectral; crear, gestionar y almacenar datos espaciales. GRASS GIS ofrece tanto una interfaz gráfica de usuario intuitiva, como así también una sintaxis de línea de comandos para facilitar las operaciones. GRASS GIS puede interactuar con impresoras, plotters, digitalizadores, y bases de datos para

desarrollar nuevos datos, como así también gestionar datos existentes.



Capacidades

Análisis Raster: Importación de datos a raster y conversión de vectores de área, búfer de estructuras de línea, modificaciones de la tabla de colores, conversión a vectores y formato de datos punto, análisis de correlación/covarianza, álgebra de mapas (mapa calculadora), interpolación para valores perdidos, análisis de la matriz de vecindad, superposición raster con o sin peso, reclasificación de etiquetas celulares, reescalado de valores de celda.

Análisis Raster 3D: importación de datos 3D y exportación, máscaras 3D, interpolación 3D, visualización 3D, interfaz y herramientas de visualización.

Análisis vectorial: generación de contorno de superficies raster, conversión a formato raster y datos de punto, de digitalización, reclasificación de etiquetas de vectores, superposición de capas vectoriales.

Análisis de datos puntos: triangulación Delaunay, interpolación de cotas de superficie, polígonos de Thiessen, análisis topográfico (curvatura, pendiente, orientación).

Procesamiento de imágenes: Apoyo a las imágenes aéreas, datos de satélite (ópticos, radar, térmicas), detección de bordes, filtrado de frecuencia (Fourier, matrices de convolución), Fourier y transformación de Fourier inversa, histogramas, transformación IHS a RGB, Ortho foto rectificación, Análisis de Componentes Principales (PCA), correcciones radiométricas (Fourier), remuestreo, mejora de la resolución (RGB / IHS), RGB a la transformación IHS, detección de forma, clasificación supervisada, clasificación no supervisada

Codificación geográfica: geocodificación de mapas raster y vectoriales incluyendo (Li-

DAR) señalan nubes.

Visualización: superficies 3D con consulta 3D (NVIZ), las asignaciones de color, presentación de histograma, mapa de superposición, mapas datos específicos, mapas raster, mapas vectoriales, zoom.

Creación de mapas: Mapas de imagen, mapas Postscript, mapas HTML.

Apoyo SQL: interfaces de bases de datos (DBF, SQLite, PostgreSQL, MySQL, ODBC).

Marco temporal: apoyo para el análisis de series de tiempo para gestionar, procesar y analizar (grandes) datos ambientales de espacios temporales. Es compatible con consultas, cálculo del mapa, estadísticas y relleno de espacios para raster, vector y datos raster 3D. Está disponible un constructor topología temporal para construir conexiones de topológicas espacio-temporales entre los objetos de los mapas para extensiones 1D, 3D y 4D.

GRASS GIS 7

La última versión estable (LTS) es GRASS GIS 7, disponible desde 2015. Ofrece soporte de grandes volúmenes de datos, un motor mejorado de topológica vectorial 2D / 3D y mejora en el análisis de redes vectoriales. Los atributos se manejan por defecto en formato SQLite. El gestor de pantalla se ha mejorado para usabilidad. La herramienta NVIZ de visualización fue reescrita por completo y el procesamiento de imágenes también se ha extendido. Esta última versión también cuenta con grass.script y otros paquetes con el fin de apoyar a las secuencias de comandos de GRASS escritos en Python. El directorio de scripts de GRASS GIS 7 contiene una serie de ejemplos para usuarios finales (mientras que la secuencia de comandos en GRASS GIS 6 son scripts de shell).

Modelo Meteorológico WRF/CAEARTE

3.1. Introducción

El sistema desarrollado puede entenderse como un sub-producto del modelo meteorológico Weather Research and Forecasting (WRF), en este capítulo abordaremos de manera general, las características de la implementación de este modelo numérico de predicción del tiempo. El modelo se encuentra en fase operativa, de manera experimental, en la unidad de Consultoría en Aplicaciones Espaciales de Alerta y Respuesta Temprana a Emergencias (CAEARTE) perteneciente a la Comisión Nacional de Actividades Espaciales.

El objetivo de la implementación operativa del modelo numérico de predicción del tiempo es satisfacer la necesidad institucional de contar con datos de predicción meteorológica, para ser utilizados tanto en sistemas de alerta temprana a emergencias desarrollados dentro de la CONAE como por usuarios externos que así lo requieran. Los resultados o productos generados son distribuidos a través de un servidor web en distintos formatos, comúnmente utilizados en sistemas, modelos o algoritmos.

3.2. Características de la Implementación

El modelo numérico de predicción del tiempo utilizado es el WRF [30] con condiciones iniciales y de contorno del GFS [31].

Las condiciones iniciales y de contorno se obtienen del producto denominado "GFS 0.5 degree". Las características de este producto pueden encontrarse en la siguiente dirección [32]. La versión de WRF utilizada para la producción del pronóstico es V3.4.1 con núcleo dinámico ARW. Las parametrizaciones de los procesos de sub-grilla utilizados son los siguientes:

1. Parametrización de cúmulos: Kain-Fritsch .
2. Parametrización de la microfísica: WRF Single-Moment 3-class (WSM3) .
3. Parametrización de la capa límite planetaria: Yonsei University (YSU) PBL.

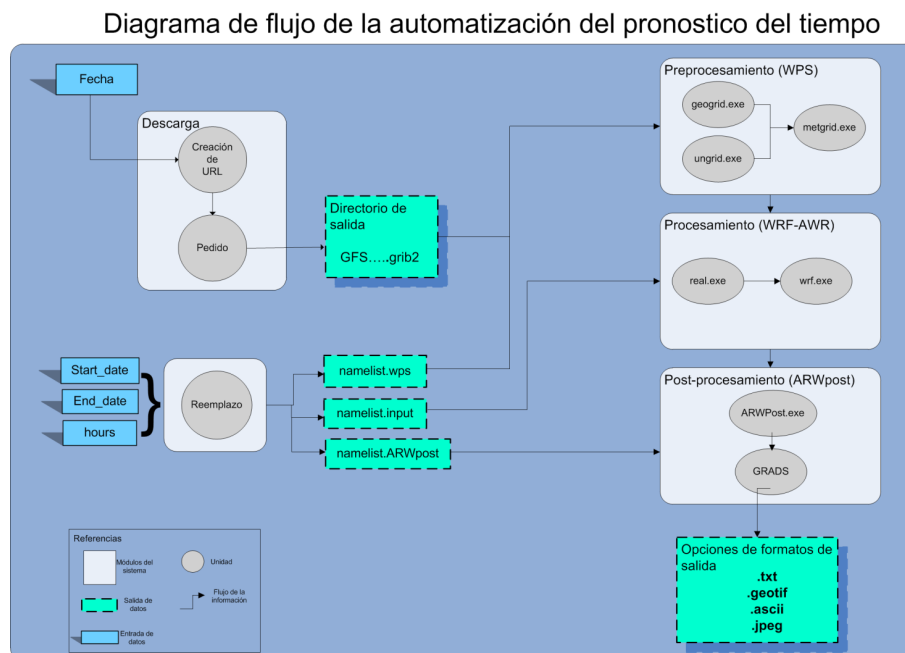
4. Parametrización de radiación de onda larga: Rapid Radiative Transfer Model (RRTM) Longwave.
5. Parametrización de radiación de onda corta: MM5 (Dudhia) .
6. Modelo de suelo: Noah LSM.

Información sobre estas parametrizaciones y otras opciones disponibles pueden encontrarse en los siguientes documentos, A Description of the Advanced Research WRF Versión 3 [33] y ARW Versión 3 Modeling System User's Guide [34].

El dominio de los productos finales abarca el territorio Argentino (con excepción del territorio antártico), la República Oriental del Uruguay, la República de Chile (Chile Continental) y la República del Paraguay. El dominio horizontal tiene una resolución aproximada de 30Km (100x150 puntos) y la resolución vertical es de 27 niveles en coordenadas sigma-p.

La producción del pronóstico se realiza mediante una corrida diaria inicializada con los datos de la Hora 00:00 UTC. Actualmente la relación entre UTC y HOA es: HOA = UTC-3, por lo tanto la hora 00:00 UTC equivale a las 21:00 HOA del día anterior. El pronóstico se genera a 72 hs (3 días) desde su inicialización.

Los productos generados tienen una resolución horizontal de aproximadamente 15 Km (0.135 grados) lograda a través de una interpolación. La proyección de los mismos es Geographic Lat/Lon con Datum WGS-84.



3.3. Descripción de los Productos

Los productos generados por esta implementación son distribuidos a través del sitio web <http://200.16.81.176/wrf/> y son los siguientes:

- Temperatura. Esta variable corresponde a la temperatura ambiente a 2 m del nivel del suelo.
 1. Temp. a 2 mts [C]. Contiene la temperatura a 2 m cada 2 hs. durante las 72 hs. de pronóstico.
 2. Temp. máximas [C]. Contiene las temperaturas máximas a 2 m para cada uno de los 3 días de pronóstico.
 3. Temp. mínimas [C]. Contiene las temperaturas mínimas a 2 m para cada uno de los 3 días de pronóstico
- Precipitación. Esta variable corresponde a la precipitación acumulada.
 1. Acumulada cada 2 hs [mm/2h]. Contiene la precipitación acumulada cada 2 hs. durante las 72 hs. de pronóstico.
 2. Acumulada cada 24 hs [mm/24h]. Contiene la precipitación acumulada para cada uno de los tres días pronosticados.
 3. Acumulada cada 72 hs [mm/72h]. Contiene la precipitación acumulada para todo el periodo pronosticado (3 días).
- Humedad relativa. Esta variable corresponde a la humedad relativa a 2 m del nivel del suelo.
 1. RH a 2 mts [%]. Contiene la RH a 2 m cada 2 hs. durante las 72 hs. de pronóstico.
 2. Viento. Esta variable corresponde al viento a 10 m del nivel del suelo.
 3. Viento a 10 mts [m/s]. Contiene la intensidad y dirección del viento a 10 m cada 2 hs. durante las 72 hs. de pronóstico.
- Temperatura y viento. Este producto es una composición de la temperatura y la dirección del viento.

Viento a 10 mts + temperatura a 2 mts [m/s] + [C]. Contiene a gráficos de superposición entre la temperatura a 2 m y la dirección del viento a 10 m. Los gráficos se dan cada 2 hs. para las 72 hs. de pronóstico.

- Nubosidad. Este producto muestra el porcentaje de nubosidad desarrollado en altura.

Nubosidad [%]. Este producto está pensado solo con la idea de identificar nubosidad con desarrollo vertical importante, típicos de tormentas. Los gráficos se dan cada 2 hs. para las 72 hs. de pronóstico.

La implementación genera salidas de los productos mencionados anteriormente en los siguientes formatos: imagen .png, un archivo GeoTIFF .tif y un archivo de texto plano .csv con tres columnas, a saber, latitud, longitud y la variable seleccionada al tiempo seleccionado, para el dominio completo.

3.4. Desarrollo Módulos de Meteogramas

3.4.1. Requerimientos

Como mencionamos anteriormente, el desarrollo del sistema CS-FFDI esta intimamente acoplado a las aplicaciones del modelo WRF. Por esta razón, adicionalmente se propuso la tarea de desarrollar un Módulo de Meteogramas, con el objetivo de familiarizarse con las salidas del modelo WRF.

Para determinar los requisitos necesarios para el desarrollo de los módulos de los meteogramas, nos basamos en la necesidades requeridas por los miembros que integran el proyecto WRF/CONAE.

El sistema deberá manejar variables de entradas que representa coordenadas. La representación usual de estas variables son pares números flotantes correspondientes a la latitud y longitud de una coordenada geográfica, los cuales deben pertenecer al dominio solicitado. Haciendo uso de esta información, el módulo deberá reproducir meteogramas de las variables ambientales de: temperatura, precipitación, humedad relativa, nubosidad, intensidad y dirección del viento.

El dominio que se tratará corresponderá al conjunto de coordenadas pertenecientes al territorio Argentino (con excepción del territorio antártico), la República Oriental del Uruguay, la República de Chile (Chile Continental) y la República del Paraguay.

El sistema en su totalidad deberá ser implementado en una ambiente de código abierto.

3.4.2. Módulos de Entradas

El módulo contará de repositorios encargados de proveer los archivos de datos de las variables ambientales mencionadas anteriormente. Estos son agrupados en seis directorios identificados según el tipo de dato en información que vuelcan a los módulos:

- **temp:** Contiene los archivos en formato TXT, correspondientes a los datos de temperatura a 2 mts del suelo pronosticados para las próximas 72 hs de todo el dominio.
- **cl:** Contiene los archivos en formato TXT, correspondientes a los datos de nubosidad pronosticados para las próximas 72 hs de todo el dominio.
- **ws:** Contiene los archivos en formato TXT, correspondientes a los datos de intensidad de viento pronosticados para las próximas 72 hs de todo el dominio.

- **wd:** Contiene los archivos en formato TXT, correspondientes a los datos de dirección del viento pronosticados para las próximas 72 hs de todo el dominio.
- **rh:** Contiene los archivos en formato TXT, correspondientes a los datos de humedad relativa pronosticados para las próximas 72 hs de todo el dominio.
- **rain:** Contiene los archivos en formato TXT, correspondientes a los datos de precipitación pronosticados para las próximas 72 hs de todo el dominio.

También contará de seis archivos procesados por defecto, los cuales contendrán los valores pronosticados de las seis variables ambientales correspondiente a la coordenada que representa la ubicación de la ciudad de Córdoba.

3.4.3. Administración de Datos

Se requerirá en todo caso la verificación de los datos de entrada para garantizar que los datos ingresados correspondan al dominio requerido.

3.4.4. Interfaz web

El módulo deberá publicar los meteogramas generados vía web, en la pagina de WRF/CONAE (<http://200.16.81.176/wrf/>) , mediante una interfaz intuitiva para el usuario. La funcionalidades requeridas son:

El módulo deberá visualizar los meteogramas generados para a las seis variables ambientales(temperatura, intensidad y direscción del viento, humedad relativa, precipitación y nubosidad) correspondientes a la coordenada solicitada y al pronóstico de las próximas 72hs.

Se permitirá la descarga de todos los gráficos generados en los siguientes formatos: PNG, JPEG, PDF, SVG.

Además se deberá mostrar un mapa resaltando la ubicación de la coordenada requerida.

3.4.5. Arquitectura

La arquitectura del sistema esta conformada por tres componente principales: el **usuario**, quien es el que hace las peticiones al **servidor**, y éste a su vez utiliza los datos almacenados en la **base de datos** para responder tales peticiones.

A continuación se muestra la figura que simplifica el funcionamiento de dicha arquitectura.

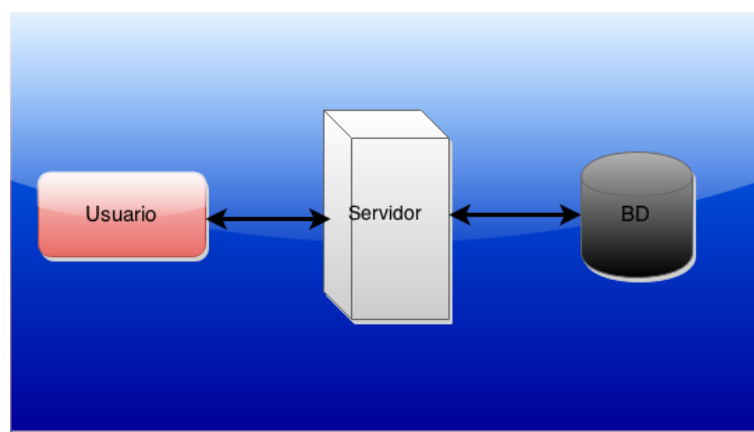


Figura 3.14: Arquitectura del sistema WRF/CONAE

Los componentes que forman partes del Módulo de Meteogramas (MM) se describen a continuación:

Repositorio: es el componente que almacena los archivos de salida del sistema WRF/CONAE, como así también los archivos de datos de las variables ambientales que se graficarán por defecto en la página y el archivo con el conjunto de coordenadas tomado como dominio.

BD: es la base de datos que contiene los datos de provincias/localidades y los 4 puntos más cercanos a dicha localidad, pertenecientes al conjunto de coordenadas tomado como dominio.

Analizador: es el componente encargado de verificar que los datos introducidos por el usuario pertenezcan al dominio requerido. Por lo tanto éste debe interactuar con el repositorio (el archivo que contiene el conjunto de coordenadas).

Buscador de coordenadas: Como los datos de las variables ambientales se encuentran siempre en un mismo orden dentro de los archivos correspondientes, es necesario contar con un buscador de coordenadas para obtener el índice de la fila en donde se hallarán los datos pertenecientes a tal coordenada.

Este componente también interactúa con el archivo que contiene el conjunto de coordenadas.

Constructor de datos: Una vez obtenido el índice en donde se ubican los datos pertenecientes a una coordenada en particular, se debe proceder a la recolección de datos de cada una de las variables ambientales para las 72hs pronosticadas.

Graficador de meteogramas: es el encargado de graficar los meteogramas de acuerdo a la salida obtenida por el Constructor de Datos.

Generador de mapas: es el encargado de crear un mapa en el que se muestra la ubicación de la coordenada solicitada.

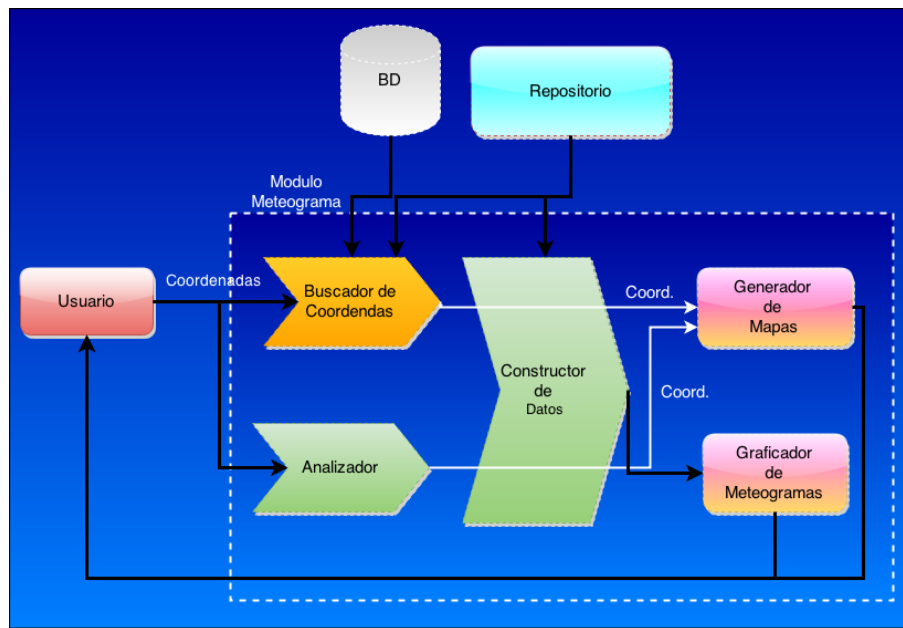


Figura 3.15: Arquitectura del Módulo de Meteogramas

3.4.6. Diseño y Desarrollo

En esta sección se explicarán los casos de uso tomados en cuenta por el sistema y la implementación desarrollada para llevar a cabo el funcionamiento de los mismos.

Casos de uso

Nombre: Mostrar Meteogramas utilizando el selector de provincias/localidades
Descripción: Permite visualizar los meteogramas de todas las variables ambientales requeridas, correspondientes a un punto(coordenada) y además muestra la ubicación de tal punto en un mapa
Actor: Usuario
Flujo Normal: El actor selecciona una localidad a través del selector de provincias/localidades. El MM busca en la base de datos los 4 puntos más cercanos (pertenecientes al dominio) a la coordenada seleccionada. El MM utiliza los 4 puntos para contruir el conjunto de datos para cada meteograma. El MM grafica los meteogramas y el mapa correspondiente.

Cuadro 3.16: Caso de uso Nro: 1

Nombre: Mostrar Meteogramas ingresando las coordenadas manualmente
Descripción: Permite visualizar los meteogramas de todas las variables ambientales requeridas, correspondientes a un punto(coordenada) y además muestra la ubicación de tal punto en un mapa
Actor: Usuario
Flujo Normal: El actor ingresa la coordenada deseada. El MM verifica que tal coordenada pertenezca al dominio. El MM crea el conjunto de datos de todas las variable ambientales a graficar El MM grafica los meteogramas y el mapa correspondiente.
Flujo Alternativo: Si las coordenadas no pertenecen al dominio, el sistema le muestra un mensaje de error al actor

Cuadro 3.17: Caso de uso Nro: 2

Desarrollo

Para la implementación del MM se utilizaron los lenguajes de programación HTML para estructura del página web, CSS para codificar la apariencia de la misma y Jquery para la codificación de las funcionalidades requeridas. Las funcionalidades del MM se detallan a continuación:

Módulo Meteograma
+Analizador
+Buscador_coordenadas
+Costructor_datos
+Graficador_meteogramas
+Generador_mapa

Cuadro 3.18: Funcionalidades MM

Inputs
(String,String): Latitud y Longitud (coordenada).
Outputs
Bool: <i>True</i> si la entrada corresponde al dominio, caso contrario <i>False</i> .

Cuadro 3.19: Verificador

Inputs
(String,String): Latitud y Longitud (coordenada).
Outputs
Nat: Índice de la ubicación de la coordenada dentro del archivo si se introduce la coordenada manualmente.
[Nat,Nat,Nat,Nat]: Los cuatro índices correspondientes a las coordenada más cercanas al punto solicitado si se utiliza el selector provincias/localidades.

Cuadro 3.20: Buscador_coordenadas

Inputs
Nat: Índice.
[Nat,Nat,Nat,Nat]: Los cuatro índices correspondientes a las coordenada más cercanas al punto solictado si se utiliza el selector provincias/localidades.
Outputs
temp, ws, wd, prec, cl, rh: arreglos que contienen lo datos pronósticados para las próximas 72hs de las variables ambientales de temperatura, intensidad del viento, velocidad del viento, precipitación, nubosidad y humedad relativa.

Cuadro 3.21: Constructor_datos

Inputs
temp, ws, wd, prec, cl, rh: arreglos que contienen lo datos pronósticados para las próximas 72hs de las variables ambientales de temperatura, intensidad del viento, velocidad del viento, precipitación, nubosidad y humedad relativa.
Outputs
Muestra en la página del WRF/CONAE los gráficos de los correspondintes meteogramas solicitados

Cuadro 3.22: Graficador_meteograma

Inputs
(String,String): Latitud y Longitud (coordenada).
Outputs
Muestra en la página del WRF/CONAE un mapa centrado en la ubicación de la coordenada introducida por el usuario.

Cuadro 3.23: Generador_mapa

Interfaz Web

El Módulo de Meteogramas al ser un subproducto del WRF, publicará sus datos en la pagina web <http://200.16.81.176/wrf/>.

La siguiente figura expone la interfaz de usuario desarrollada:

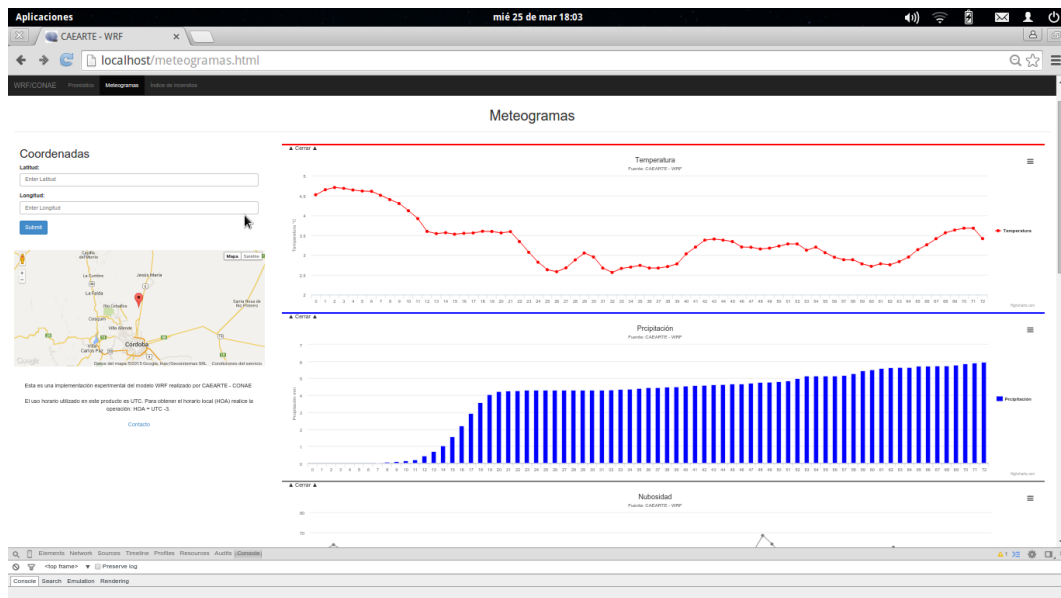


Figura 3.16: Interfaz web del MM

Modelo Forest Fire Danger Index (McArthur. 1967)

4.1. Descripción del Algoritmo

En este capítulo se abordará con detalle la descripción del modelo de peligrosidad de riesgo de incendios forestales implementado.

Los sistemas de clasificación del peligro de incendio fueron usados por primera vez en Australia en 1936. Después de los devastadores incendios de 1939, se concentraron los esfuerzos en mejorar el manejo del fuego. El FFDI fue introducido por McArthur en 1958 (McArthur, 1967)[22] y continua siendo desarrollado. En la actualidad se está usando la versión IV del índice que subdivide el riesgo de incendio en 5 clases de acuerdo a la dificultad de supresión del incendio (bajo, moderado, alto, muy alto y extremo).

El FFDI (como la mayoría de los índices de riesgo de incendio) está basado en un modelo empírico de comportamiento del fuego en bosques abiertos, pero el índice se aplica actualmente a una gran variedad de otras coberturas tales como: todos los tipos de bosques, arbustales, brezales, etc. Si bien el comportamiento del fuego es diferente en estos otros tipos de vegetación, la mayor parte de los factores básicos de peligro de incendio son comunes a todos ellos. La adaptación a otras coberturas se realiza por medio de la redefinición de las categorías de riesgo en cada caso.

La estructura del FFDI se muestra en la figura 4.2 . Las entradas requeridas para correr el modelo son la temperatura del aire, la humedad relativa, la velocidad del viento, la precipitación, el tiempo desde la última precipitación y el índice de sequía Keetch-Byram (KBDI, Keetch and Byram 1968)[35]. El cálculo del KBDI en sí mismo requiere de la temperatura diaria máxima, la precipitación diaria, el KBDI del día anterior y la lluvia media anual para el área bajo consideración.

La magnitud del índice es directamente proporcional a la velocidad de propagación del fuego en un bosque abierto de eucaliptos, sobre terreno plano y con una carga de combustible finos de 12 t/ha. Para otros tipos de vegetación, la relación con la tasa de variación puede variar. El índice se subdivide luego en clases de peligro basadas en la dificultad de extinguir el incendio (Tabla 4.23) que van desde baja (baja dificultad) a extrema (donde es extremadamente difícil, sino imposible, extinguir el incendio debido a la alta velocidad de propagación y la cantidad de focos nuevos por delante del frente de fuego).

El FFDI es calculado operativamente en el departamento de meteorología de Australia (Australian Bureau of Meteorology, <http://www.bom.gov.au/>). El sistema combina un

índice de deficiencia de humedad en el suelo con variables climáticas como la temperatura, la humedad relativa, la velocidad del viento y la lluvia reciente para producir un índice de la dificultad de extinguir un fuego sobre un tipo estandarizado de combustible (bosque de eucaliptos seco con 12.5 t/ha de combustible fino) sobre un terreno plano o levemente ondulado.

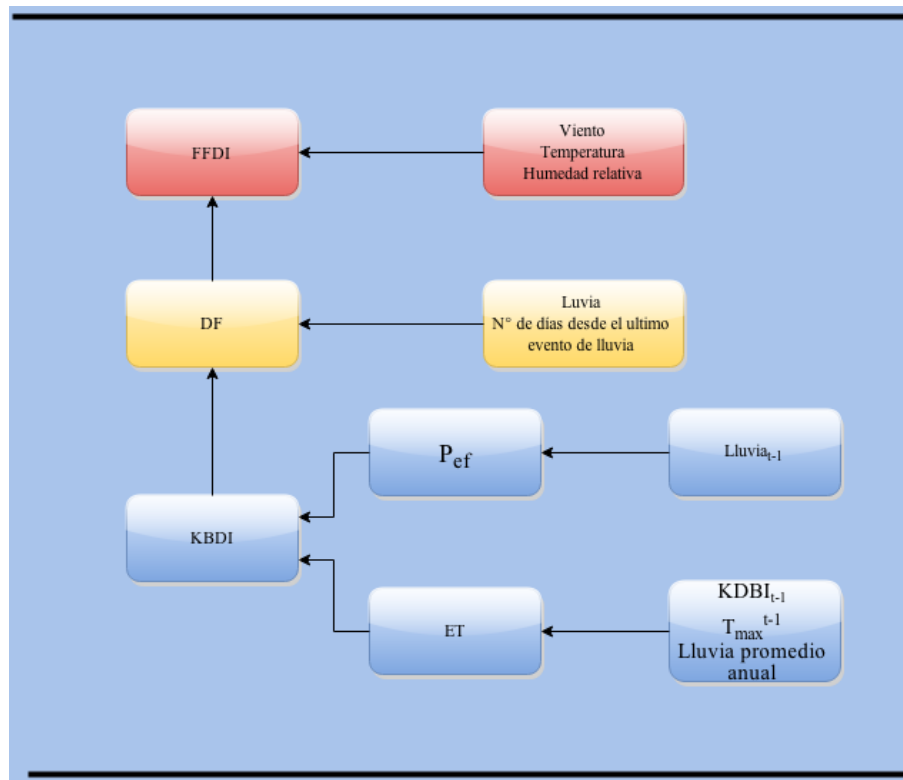


Figura 4.17: Estructura y diagrama del FFDI (McArthur, 1967).

El FFDI australiano que se utiliza para evaluar la probabilidad y severidad de los incendios forestales, fue derivado empíricamente por McArthur (1967) y expresado como se muestra a continuación por Noble et al. (1980)[27]:

$$FFDI = 2 \exp(-0,450 + 0,987 \ln(D) - 0,0345H + 0,0338T + 0,0234V)$$

Donde T es la temperatura (C), H la humedad relativa (%), V la velocidad del viento (m/seg), y D el factor de sequía que tiene un rango de 0 a 10, con D = 10 indicando la máxima disponibilidad de combustible.

FFDI	Rango
Bajo	0-5
Moderado	5-12
Alto	12-24
Muy Alto	24-50
Extremo	50+

Cuadro 4.24: Valores de FFDI para cada clase de riesgo de fuego (Luke and McArthur, 1986)[36].

4.1.1. Factor de Sequía

El factor de sequía DF es un estimador del contenido de humedad de los combustibles secos, o equivalentemente, la cantidad de combustible seco disponible para quemarse. Se calcula combinando los estimadores de efectos del humedecimiento directo por lluvias significativas recientes y humedecimiento desde abajo, que depende del contenido de humedad del suelo. La contribución del segundo efecto se calcula como un déficit de humedad de suelo, usando el KBDI que se describe en la sección 4.1.2 (Keetch and Byram, 1968)[35]. El factor de sequía y el KBDI se calculan para cada día.

El factor de sequía se calcula usando la fórmula de Griffiths (1999)[26] y se basa en el déficit de humedad de suelo KBDI y la lluvia de los últimos 20 días. Se obtiene como:

$$DF = 10,5 \left(1 - \frac{\exp(-KBDI+30)}{40}\right) \frac{y+42}{y^2+3y+42}$$

Donde y expresa la influencia de la lluvia pasada P y el número de días desde que cayó N , y se calcula como:

$$\frac{P-2}{N^{1,3}} \text{ if } N \geq 1 \text{ and } P > 2$$

$$\frac{P-2}{8^{1,3}} \text{ if } N = 1 \text{ and } P > 2$$

$$0 \text{ if } P \leq 2$$

El DF final necesita ser limitado para que sea menor que el máximo factor de sequía de 10, por lo tanto:

$$DF = \text{mín}(10, DF)$$

P es la lluvia en mm durante un evento, N es el tiempo desde el evento de lluvia en días, I el índice de sequía del suelo en mm (Keetch and Byram, 1968)[35]. A cada evento

de lluvia se le asigna un periodo nominal de 24 horas en el que se considera que ocurrió. Si el evento ocurrió en las 24 horas previas a las 9 am del presente día, entonces $N = 1$. Si la lluvia ocurrió a partir de las 9 am del corriente día, entonces $N = 0$. La significancia de un evento de lluvia está dada por la variable y . El evento de lluvia más significativo es aquel que en los últimos 20 días maximiza y o equivalentemente, minimiza DF. A mayor DF, más seco el combustible. La cantidad I, KBDI en las ecuaciones anteriores, se relaciona a la temperatura máxima del día anterior, la lluvia anual, el número de días desde la última lluvia y la última lluvia. Este índice se explica a continuación.

4.1.2. KBDI

El índice de sequía KBDI, creado por John Keetch y George Byram en 1968 para el Departamento de Servicios Forestales de los Estados Unidos, fue ideado basado en modelos matemáticos para predecir la probabilidad de incendios basada en la humedad del suelo y otras condiciones relacionadas a la sequía.

En el KBDI el balance de agua se expresa como déficit de humedad de suelo, que es la cantidad de agua en mm necesaria para llevar el suelo a su capacidad de campo; es decir, la cantidad de agua que el suelo puede contener en sus capilares contra los efectos de la gravedad. Un bajo déficit de humedad del suelo significa muy baja o ninguna restricción para la evaporación desde el suelo o la transpiración por las plantas, y también muy baja capacidad de infiltración en caso de fuertes lluvias. Un alto déficit de humedad de suelo significa que hay muy poca agua disponible para la evaporación por parte del suelo o la transpiración por parte de las plantas. El KBDI asume un máximo déficit de 200 mm y un mínimo déficit de cero. No permite exceder la capacidad de campo (déficit de humedad de suelo negativo) y tampoco permite el drenaje a niveles más profundos.

El KBDI varía de 0 (no sequía suelo a capacidad de campo) a 800 (extrema sequía y se basa en la capacidad del suelo para contener 8 pulgadas (200 mm)) de agua. La profundidad del suelo requerida para contener 200 mm de agua de humedad varía. Una sequía prolongada (alto KBDI) influye sobre la intensidad del fuego principalmente porque los combustibles tienen un menor contenido de humedad. El KBDI es una medida de la sequía meteorológica, refleja la ganancia o pérdida de agua del suelo a causa de las condiciones meteorológicas. Hay 5 supuestos inherentes a la formulación del KBDI:

1. La tasa de pérdida de humedad del suelo es función de la cobertura vegetal, que a su vez es función de la lluvia media anual.
2. La función vegetación-lluvia es aproximada por una curva exponencial y la pérdida de humedad es función de la lluvia media anual.
3. La tasa de pérdida de humedad del suelo está determinada por la evapotranspiración.
4. La tasa de pérdida de humedad del suelo es aproximada por una curva exponencial decreciente en la cual el punto de marchitez permanente es el valor más bajo de humedad.
5. La profundidad del suelo es tal que tiene una capacidad de carga de 200 mm.

En términos generales, el balance de agua está determinado por la diferencia entre la cantidad de agua que se infiltra, llamada lluvia efectiva en este contexto, y la evapotranspiración, que es la cantidad de agua que deja el suelo ya sea por transpiración de las plantas o evaporación del suelo.

El cambio en el déficit se expresa entonces como:

$$\Delta KBDI = -P_{eff} + ET$$

Donde P_{eff} es la lluvia efectiva en mm por día, que disminuye el déficit, y ET es la evapotranspiración en mm por día que incrementa el déficit. La lluvia efectiva diaria se basa en la lluvia de las 24 horas anteriores que disminuye una cantidad que representa la intercepción y el escurrimiento. La intercepción y/o escurrimiento es aproximada por el KBDI como los primeros 5 mm dentro de días consecutivos de lluvia diferente de cero. Esto es independiente de la cobertura del suelo y no se distingue entre intercepción por la cobertura vegetal o el escurrimiento superficial.

La evapotranspiración depende del déficit de humedad del suelo del día anterior $KBDI_{n-1}$, la temperatura máxima del día anterior T_{max} y la lluvia anual R_{anual} .

$$P_{eff} = rain - (intercepcion, escurrimiento)$$

$$ET = (203,2 - KBDI_{t-1}) \frac{0,96 \exp(0,0875T_{max} + 1,5552) - 8,3}{1 + 10,88 \exp(-0,00173R_{anual})} 10^{-3}$$

Finalmente, el nuevo valor de KBDI para cada día se calcula como:

$$KBDI_t = KBDI_{t-1} - \Delta KBDI$$

Se asume que el contenido de agua del suelo comienza a capacidad de campo, así que los cálculos comienzan con $KBDI = 0$, previo al primer día (Snyder et al., 2006)[37]. El KBDI se calcula agregando el cambio en el índice de sequía de cada día al KBDI del día anterior. En cada día, un valor para el déficit de agua en el suelo, en mm, se computa como el KBDI del día anterior menos la lluvia neta (mm) de ese día. Si el resultado es negativo, entonces $KBDI = 0$. La precipitación neta (mm) es calculada como la precipitación registrada menos 5.08. El déficit de humedad del suelo se calcula como $203.2 - KBDI$ (mm), que implica una reducción lineal en la evapotranspiración potencial para dar cuenta del efecto de secado a medida que disminuye el contenido del agua del suelo desde 203.2 mm. La evapotranspiración potencial en mm es estimada diariamente como la razón de una función exponencial de la temperatura máxima en C dividida por una exponencial de la lluvia media anual en mm.

El KBDI tiene un esquema sencillo por el cual los primeros 5 mm de un evento de lluvia (días consecutivos de lluvia no nula) se pierden por intercepción o escorrentía superficial. No se hace distinción entre los dos procesos.

4.1.3. Ecuaciones

FFDI (Noble et al., 1980)

$$FFDI = 2 \exp(-0,450 + 0,987 \ln(DF) - 0,0345H + 0,0338T + 0,0234V)$$

Variables

- **FFDI** = McArthur Forest Fire Danger Index
- **DF** = Factor de sequía
- **H** = Humedad Relativa (%)
- **T** = Temperatura (C)
- **V** = Velocidad del viento promedio (km/hs)

DF (Griffiths, 1999)

$$DF = \min[10,5 - \exp\left(\frac{-(KBDI+30)}{40}\right) \frac{y+42}{y^2+3y+42}]$$

Donde y es

$$\frac{P-2}{N^{1,3}} \text{ if } N \geq 1 \text{ and } P > 2$$

$$\frac{P-2}{8^{1,3}} \text{ if } N = 1 \text{ and } P > 2$$

$$0 \text{ if } P \leq 2$$

calculado para los últimos 20 días.

Variables

- **DF** = Factor de sequía

- **KBDI** = Índice de sequedad del suelo estimado como el índice de Keetch y Byram
- **P** = lluvia en mm durante un evento (período de 24 horas hasta las 9 am de cada día)
- **N** = número de días desde el último evento de lluvia

KBDI (Crane, 1982)[38]

$$\Delta KBDI = -P_{eff} + ET$$

Evapotranspiración

$$ET = (203,2 - KBDI_{t-1}) \frac{0,96 \exp(0,0875T_{max} + 1,5552) - 8,3}{1 + 10,88 \exp(-0,00173P_{an})} 10^{-3}$$

Lluvia Efectiva

$$\text{Si } P_{t-1} \geq 5,08 \text{ entonces } P_{eff} = P_t$$

$$\text{Si } 0 < P_{t-1} < 5,08 \text{ entonces } P_{eff} = P_t - LEFT$$

$$\text{Sino } P_{eff} = \max[(P_t - 5,08), 0]$$

$$LEFT = \max[(5,08 - P_t), 0]$$

Finalmente, el nuevo valor de KBDI para cada día se calcula como:

$$KBDI_t = \max[((KBDI_{t-1} - P_{eff}) + ET), 0]$$

Variables

- **ET** = Evapotranspiración en mm
- P_{an} = lluvia promedio anual en mm
- P_{eff} = lluvia efectiva en las últimas 24 horas o lluvia en mm
- P_t = lluvia total en las últimas 24 horas o lluvia acumulada hasta las 9 am (la lluvia del presente día en mm)
- P_{t-1} = lluvia del día anterior
- $KBDI_{t-1}$ = índice de sequedad del día anterior
- T_{max} = temperatura máxima en C
- **LEFT** = cantidad de los 5.08 mm de la capacidad de intercepción que queda

Funcionamiento Operativo

5.1. Instalación del sistema CS-FFDI

A continuación se darán las bases para la instalación del CS-FFDI.

5.1.1. Requisitos mínimos del Software

- Sistema Operativo Ubuntu 12.04 de 64 bits
- Interprete de Python 2.7.6
- Software GRASS GIS 7.1
- Cualquier Navegador Web (con excepción de Internet Explorer)

5.1.2. Instalación de GRASS GIS 7.1:

Para la instalación de GRASS GIS 7.1 se deben seguir las siguientes instrucciones:

1. Instalar svn:

```
1 sudo apt-get install subversion
```

2. Descargar grass desde el repositorio de svn:

```
1 svn checkout https://svn.osgeo.org/grass/grass/trunk grass7_trunksvn
```

3. Luego instalar las siguientes librerías:

```
1 sudo apt-get install flex bison debhelper dpatch autoconf2.13
  autotools-dev python-dev g++ gcc gettext graphviz libcairo2-dev
  libfftw3-dev libfreetype6-dev libgdal1-1.7.0 libgdal1-dev libglu1-
  mesa-dev libglw1-mesa-dev libncurses5-dev libproj-dev libreadline-
  dev libsqlite3-dev libtiff4-dev libwxgtk2.8-dev libxmu-dev libxmu-
  headers libxt-dev mesa-common-dev proj-bin python-numpy python-
  wxgtk2.8 subversion wx-common zlib1g-dev
```

4. Ingresar al directorio donde se bajaron los fuentes (grass7_trunksv)

5. Configuración:

```
1 CFLAGS="-g -Wall -Werror-implicit-function-declaration -fno-common -
  Wextra -Wunused" CXXFLAGS="-g -Wall"
2 ./configure --prefix=/usr/local --with-gdal --with-proj --with-proj-
  share=/usr/share --with-glw --with-nls --with-readline --without-
  tcltk --with-cxx --enable-largefile --with-freetype --with-
  freetype-includes=/usr/include/freetype2 --with-sqlite --with-
  cairo --with-python=/usr/bin/python2.6-config --with-wxwidgets --
  with-geos --with-pthread
```

6. Compilación:

```
1 sudo make
```

5.1.3. Configuración de GRASS para el sistema CS-FFDI:

Para poder ejecutar el sistema CS-FFDI es necesario configurar GRASS. Los pasos a seguir se describen a continuación:

1. Ejecutar GRASS 7.1:

- A través del ejecutable
- O por consola ejecutando los siguientes comandos:

```
1 cd /grass7_trunksvn/bin.i686-pc-linux-gnu
2 ./grass71
```

2. Configuración del directorio de GRASS: El directorio de datos GIS se ubicará en la carpeta personal con el nombre de "grassdata". Por ejemplo: /home/kevin/grassdata

3. Configuración Locación: Seleccionar el asistente de locaciones y realizar los siguientes pasos:

- Definir el nombre de locación con el nombre "LatLon"
- Seleccionar el método correspondiente al código EPSG del sistema de referencia espacial
- Utilizar el código EPSG 4326 (corresponde al sistemas de coordenadas de Latitud y Longitud)

4. Configuración del mapset: Definir el mapset con el nombre "FFDI"

5.1.4. Compilación del modelo

1. Guardar los fuentes de CS-FFDI en una carpeta con el nombre FFDI en el directorio de la carpeta personal.

2. Crear una carpeta con el nombre 'datos-FFDI' en el directorio de la carpeta personal, el cual tendrá como función, ser el repositorio de datos.

3. Abrir una terminal y dirigirse al directorio en donde se encuentran los fuentes y ejecutar el comando:

```
1 python main.py
```

5.2. Validación del sistema

Para llevar a cabo la validación del sistema CS-FFDI se recurrió a la modalidad de testing por unidad y testing de caja negra para los distintos componentes que conforman al mismo. Para la implementación del testing se empleo la librería **unittest** de Python. También se realizaron análisis estadísticos sobre la eficacia del sistema y sobre la evolución de cada ejecución del mismo.

5.2.1. Testing

Diseño caso de test: KBDI

1. Verificar que el KBDI sea distinto de cero con las entradas apropiadas:
 - Requisito a testear: Crear una región rectangular de 20x20 pixeles y ejecutar el kbdí asignándole a los parámetros de entrada los siguientes valores: kbdí del día anterior con valores aleatorios en el intervalo (10,20), lluvia efectiva con valores aleatorios en el intervalo (0,9) y evapotranspiración con valores aleatorios en el intervalo (0,2).
 - Salida esperada: Valores del KBDI todos distinto a cero.
 - Salida: Valores del KBDI todos distintos a cero.
2. Verificar que el KBDI sea igual cero con las entradas apropiadas:
 - Requisito a testear: Crear una región rectangular de 20x20 pixeles y ejecutar el kbdí asignándole a los parámetros de entrada los siguientes valores: kbdí del día anterior con valores aleatorios en el intervalo (0,10), lluvia efectiva con valores aleatorios en el intervalo (20,30) y evapotranspiración con valores aleatorios en el intervalo (0,5).
 - Salida esperada: Valores del KBDI iguales a cero.
 - Salida: Valores del KBDI iguales a cero.

Diseño caso de test: DF

1. Verificar que el DF genere valores altos con las entradas apropiadas:
 - Requisito a testear: Crear una región rectangular de 20x20 pixeles y ejecutar el df asignándole a los parámetros de entrada los siguientes valores: kbdí del día corriente con valores aleatorios en el intervalo (0,50), y configurando el día de lluvia más significativo como los dos primeros días.
 - Salida esperada: Valores del DF mayores a 5.0 .

- Salida: Valores del DF mayores a 5.0 .
2. Verificar que el DF genere valores bajos con las entradas apropiadas:
 - Requisito a testear: Crear una región rectangular de 20x20 pixeles y ejecutar el df asignándole a los parámetros de entrada los siguientes valores: kbdi del día corriente con valores aleatorios en el intervalo (0,50), y configurando el día de lluvia más significativo como los últimos 14 días.
 - Salida esperada: Valores del DF menores a 5.0 .
 - Salida: Valores del DF menores a 5.0 .

Diseño caso de test: FFDI

1. Verificar que el FFDI genere valores altos con las entradas apropiadas:
 - Requisito a testear: Crear una región rectangular de 20x20 pixeles y ejecutar el ffdi asignándole a los parámetros de entrada los siguientes valores: factor de sequía con un valor igual a 10, temperatura con valores aleatorios en el intervalo (25,35), humedad relativa con valores aleatorios en el intervalo (0,40), intensidad del viento con valores aleatorios en el intervalo (7,15)
 - Salida esperada: Valores del FFDI deben corresponder al los rangos Alto, Muy Alto y Extremo .
 - Salida: Valores del FFDI corresponden al los rangos Alto, Muy Alto y Extremo .
2. Verificar que el FFDI genere valores bajos con las entradas apropiadas:
 - Requisito a testear: Crear una región rectangular de 20x20 pixeles y ejecutar el ffdi asignándole a los parámetros de entrada los siguientes valores: factor de sequía con un valor igual a 3, temperatura con valores aleatorios en el intervalo (5,20), humedad relativa con valores aleatorios en el intervalo (50,100), intensidad del viento con valores aleatorios en el intervalo (3,6)
 - Salida esperada: Valores del FFDI deben corresponder al los rangos Bajo y Moderado .
 - Salida: Valores del FFDI corresponden al los rangos Bajo y Moderado .

Diseño caso de test: Fallo de datos de entradas

1. Verificar que el sistema completo falle cuando los datos de entradas provenientes de WRF/CONAE no sean los apropiados:
 - Requisito a testear: Crear un conjunto de datos de entradas con valores desactualizados o un conjunto de datos de entradas incompleto.
 - Salida esperada: Error en la ejecución del Data_Manager .
 - Salida: Error en la ejecución del Data_Manager.

2. Verificar que el sistema completo falle cuando los datos de entradas sean nulos:
 - Requisito a testear: Crear un conjunto de datos de entradas con algunos valores nulo.
 - Salida esperada: Error en la ejecución del Data_Manager .
 - Salida: Error en la ejecución del Data_Manager.

Diseño caso de test: Restauración de valores sobrescritos

1. Verificar que el sistema completo restaure el valor de kbdi cuando falle en algunos de los procesos intermedios del módulo FFDI_24hs :
 - Requisito a testear: Configurar el sistema para que falle luego de sobrescribir el valor del KBDI.
 - Salida esperada: Restauración exitosa, Error módulo FFDI_24hs .
 - Salida: Restauración exitosa, Error módulo FFDI_24hs.

Diseño caso de test: Fallo en la ejecución de los módulos FFDI_24hs, FFDI_48hs, FFDI_72hs

1. Verificar que el sistema completo falle cuando la ejecución del módulo FFDI_24hs falle :
 - Requisito a testear: Configurar el sistema para que falle en algunas de las funcionalidades del módulo FFDI_24hs.
 - Salida esperada: Error en la ejecución del módulo FFDI_24hs, FFDI_48hs y FFDI_72hs .
 - Salida: Error en la ejecución del módulo FFDI_24hs, FFDI_48hs y FFDI_72hs .
2. Verificar que el sistema completo falle cuando la ejecución del módulo FFDI_48hs falle :
 - Requisito a testear: Configurar el sistema para que falle en algunas de las funcionalidades del módulo FFDI_48hs.
 - Salida esperada: Error en la ejecución del módulo FFDI_48hs y FFDI_72hs .
 - Salida: Error en la ejecución del módulo FFDI_48hs y FFDI_72hs .
3. Verificar que el sistema completo falle cuando la ejecución del módulo FFDI_72hs falle :
 - Requisito a testear: Configurar el sistema para que falle en algunas de las funcionalidades del módulo FFDI_72hs.
 - Salida esperada: Error en la ejecución del módulo FFDI_72hs .
 - Salida: Error en la ejecución del módulo FFDI_72hs .

5.2.2. Análisis Estadísticos

Análisis de eficacia

Con la finalidad de obtener resultados en cuanto a la eficacia del sistema CS-FFDI se necesitaron datos sobre los focos de calor MODIS, provisto por la EOSDIS/NASA para el período 1/02/2015-17/03/2015 . Los datos están disponible en la página web de EOSDIS (earthdata.nasa.gov) con frecuencia diaria en archivos de texto(TXT) y shapefile (SHP) . El análisis de eficacia tenia como objetivo para cada dato del índice de peligrosidad de incendio forestal (FFDI) generada por el sistema, contabilizar los focos de calor para cada una de las categorías (bajo, moderado,alto,muy alto, extremo).

Para el mismo, se utilizaron los shapefile que nos provee la fuente antes menciona y los correspondientes comandos de GRASS GIS y Python para procesar dicha información.

Los resultados obtenido para dicho análisis fueron los siguientes:

FFDI	Cantidad de focos detectados/Área promedio
Bajo	1769/18174.16
Moderado	1708/7382
Alto	1167/4705.59
Muy Alto	73/244.25
Extremo	0
Total	4717/30506

Cuadro 5.25: Cantidad de focos detectados/Área promedio para cada categoria del FFDI en el período 1/2/2015-17/3/2015

FFDI	Porcentaje de Área promedio
Bajo	59,57 %
Moderado	24,20 %
Alto	15.42 %
Muy Alto	0.8 %

Cuadro 5.26: Porcentajes de Área promedio para cada categoria del FFDI en el período 1/2/2015-17/3/2015

FFDI	Porcentaje de Cantidad de focos detectados/Área
Bajo	16.02 %
Moderado	22,58 %
Alto	25.47 %
Muy Alto	32.05 %

Cuadro 5.27: Porcentaje de Cantidad de focos detectados/Área para cada categoría del FFDI en el período 1/2/2015-17/3/2015

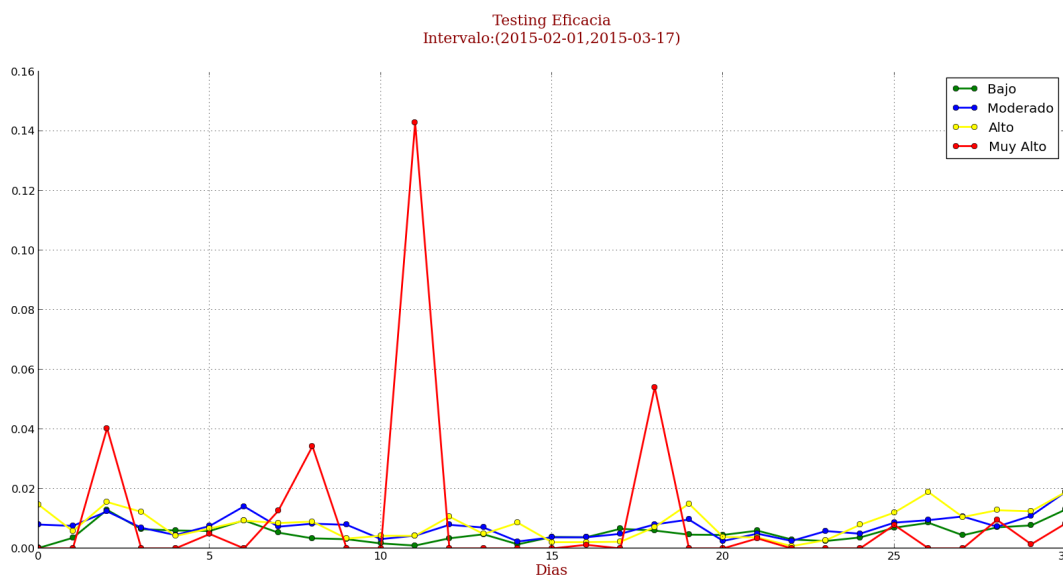


Figura 5.18: Cantidad de focos detectados/Área para cada categoría del FFDI en el período 1/2/2015-17/3/2015

Nota: Se tomaron muestra de algunos de los días pertenecientes a ese período, es decir, no se analizó todo el período en su completitud.

Conclusión:

Teniendo en cuenta el comportamiento del sistema implementado en cuanto a la cantidad de focos detectados/área, se puede observar que el mismo acierta con mayor probabilidades en las zonas consideradas como alto riesgo (Alto, Muy Alto). Se puede apreciar según los datos que figuran en la tabla 5.26 que el 80 % aproximadamente de los focos de incendios producidos se podrían haber prevenido. Un dato a tener en cuenta, es que el sistema no ha detectado focos de calor considerados como riesgo extremo.

Análisis de evolución

Se realizó un análisis de evolución del sistema que consistió en tomar datos al azar del dominio tomado en cuenta por el sistema y estudiar la variabilidad de los datos de salidas del módulos FFDI_24hs con respecto a los datos de entradas que toman los mismos. De esta manera el objetivo principal era observar los valores del FFDI por los que oscilan ciertas coordenadas. El análisis se realizó en el período 22/11/2014-16/3/2015.

Los resultados obtenidos por dicho análisis fueron los siguientes:

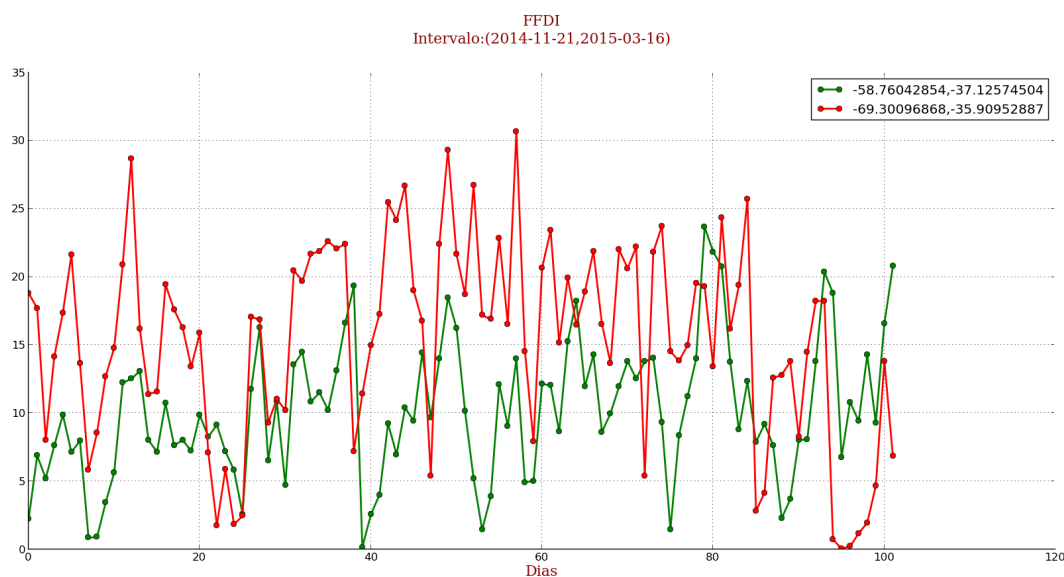


Figura 5.19: Gráfico de evolución 21/11/2014-16/03/2015

Conclusión: Se puede observar que la coordenada (-58.76042854,-37.12574504) toma valores de riesgos de incendios que van desde 0 a 24 aproximadamente, pero en promedio toma valores considerados como riesgos moderado y altos. Se puede observar que la coordenada (-69.30096868,-35.90952887) toma valores de riesgos de incendios que van desde 0 a 31 aproximadamente, pero en promedio toma valores considerados como riesgos moderado, altos y muy alto.

Casos Especiales

Otra de la manera de validar el sistema fue la de encontrar noticias relacionadas con incendios, sobre todo los producidos en el territorio argentino y observar la cartografía generada para el día en el que se produjo tal incendio.

En este trabajo presentaremos tres casos de incendios conocido recientemente. El primero ocurrió en la provincia de La Pampa el día 8/01/2015 (fuente de la noticia <http://www.lapampa.gov.ar/noticias-oficiales/47306-situacion-de-los-incendios-en-la-pampa.html>) y el segundo ocurrió en la provincia de Chubut el día 19/02/2015 (fuente de la noticia <http://www.cba24n.com.ar/content/chubut-los-incendios-consumen-mas-de-4-mil-hectareas>).

El tercer caso, se ubica en el plano internacional, y se trata de un incendio producido en la zona de La Auracanía (Chile), el día 16/03/2015 (fuente de la noticia <http://www.emol.com/noticias/1destruye-700-hectareas-de-araucarias-en-reserva-nacional-en-la-araucania.html>).

A continuación se expondrán los mapas derivados del riesgo de incendio generados para esos días.

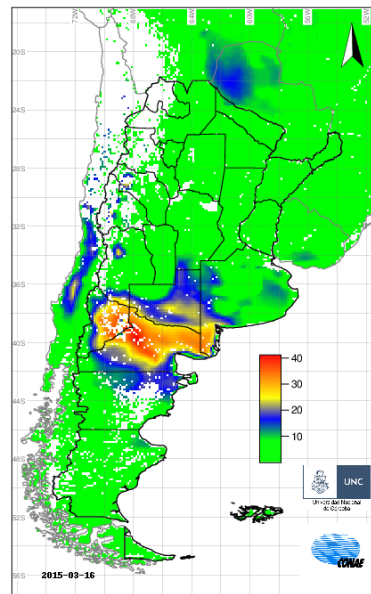


Figura 5.20: FFDI para el día 8/01/2015

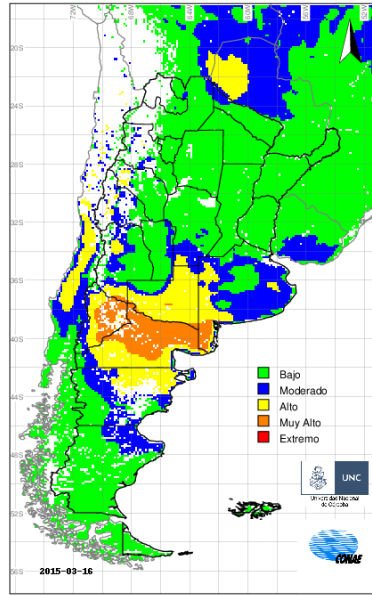


Figura 5.21: FFDI reclasificado para el día 8/01/2015

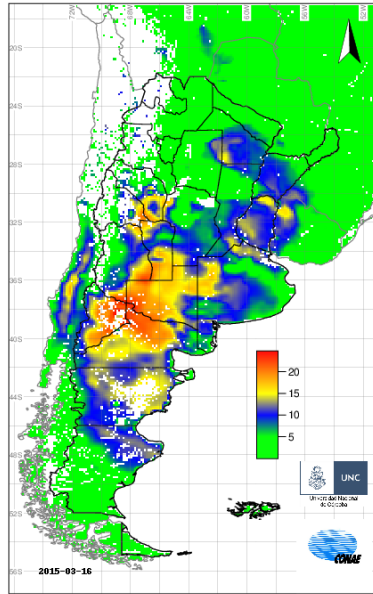


Figura 5.22: FFDI para el día 18/02/2015

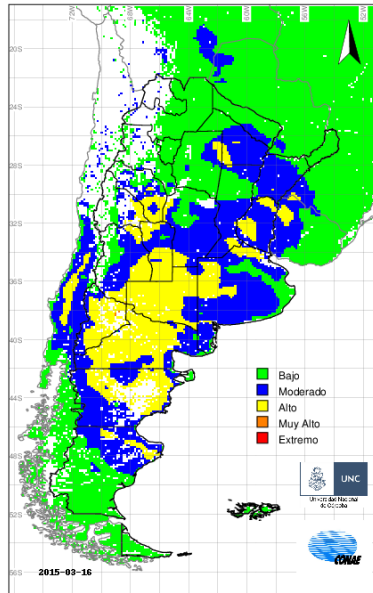


Figura 5.23: FFDI reclasificado para el día 18/02/2015

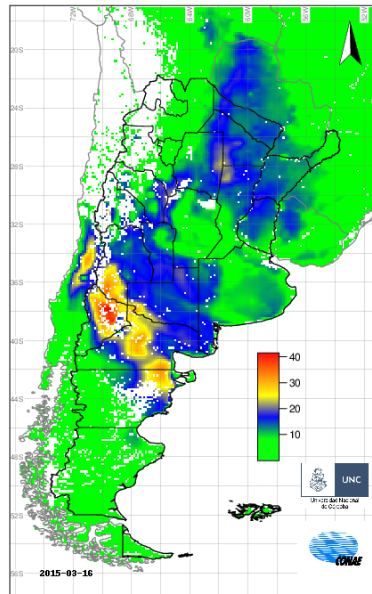


Figura 5.24: FFDI para el día 16/03/2015

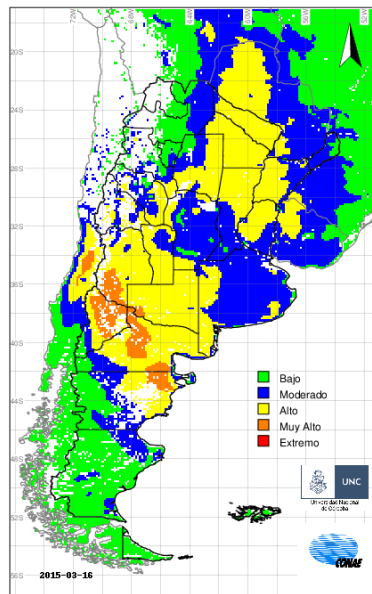


Figura 5.25: FFDI reclasificado para el día 16/03/2015

Conclusión

6.1. Trabajos Futuros

Evaluar el comportamiento del sistema en otros dominios

Sería muy importante analizar la eficacia del sistema implementado en otras regiones, para determinar en cual de todas ellas es más óptimo su rendimiento.

Mejorar el rendimiento del sistema mediante aprendizaje automático

Es de gran utilidad implementar el algoritmo utilizado por el sistema, mediante un red neuronal, para aumentar la eficacia del mismo en cuanto la cantidad de aciertos de focos de calor detectados considerados como riesgos altos y muy altos.

Analizar el comportamiento del algoritmos con datos de entradas basados en información recolectada de análisis de imágenes satelitales

Al analizar el algoritmo implementado con datos de lluvias provenientes de sistemas meteorológicos como el Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM/NASA), el cual basa sus resultados sobre las precipitaciones ocurridas, por medio del análisis de imágenes satelitales, tendríamos una perspectiva del comportamiento del algoritmo en cuanto datos más precisos, ya que como se habrá notado a lo largo del desarrollo de esta tesis, el sistema actual está implementado con datos de un modelo de predicción meteorológico (WRF).

Analizar el comportamiento del algoritmo implementado comparandolo con otros sobre un mismo dominio

Al analizar el algoritmo implementado comparandolo con otros que consideran entre sus variables de entradas los rasgos fitogeográficos de cada región, obtendríamos una perspectiva de cuan acertado está el algoritmo implementado.

Bibliografía y Referencias

1. Dirección de Bosques, 'Estadística de incendios forestales 2001', Buenos Aires, 2002.
2. Dirección de Bosques, 'Estadística de incendios forestales 2002', Buenos Aires, 2003.
3. Dirección de Bosques, 'Estadística de incendios forestales 2003', Buenos Aires, 2004.
4. Dirección de Bosques, 'Estadística de incendios forestales 2004', Buenos Aires, 2005.
5. Dirección de Bosques, 'Estadística de incendios forestales 2005', Buenos Aires, 2006.
6. Dirección de Bosques, 'Estadística de incendios forestales 2006', Buenos Aires, 2007.
7. Dirección de Bosques, 'Estadística de incendios forestales 2007', Buenos Aires, 2008.
8. Dirección de Bosques, 'Estadística de incendios forestales 2008', Buenos Aires, 2009.
9. Dirección de Bosques, 'Estadística de incendios forestales 2009', Buenos Aires, 2010.
10. USDA, 'USDA Agricultural Projections to 2020', Washington D.C. 20250-3812, 2011.
11. B.J. Stocks, M.A.Fosberg, T.J.Lynham, L.Mearns, B.M.Wotton, Q.Yang, K.Lawrence, G.R.Hartley, J.A.Mason, and D.W.Mckenny, 'Climate change and forest fire potential', pp.1-13, S1998
12. M.D.Flannigan, B.D.Amiro , K.A.Logan, B.J.Stocks, and B.M.Wotton 'Forest Fires and Climate Change in the 21ST Century', Mitigation and adaptation Strategies for Global Change, vol.11, no.4, pp.847-859, 2006.
13. W.A.Hoffmann, W.Schroeder, and R.B.Jackson, 'Regional feedbacks among fire, climate, and tropical deforestation', vol.108, pp.1-11, 2003.
14. C.M.Di Bella, G.Posse, M.E.Beget, M.A.Fischer, N.Mari, and S.Veron, 'La teledetección como herramienta de prevención, seguimiento y evaluación de incendios e inundaciones', vol.17, no.3, pp.39-52, 2008.
15. CONAE, 'Plan Espacial Nacional-Argentina en el Espacio' 2008. [Online]. Available: <http://www.conae.gov.ar/prensa/Actualizacion2008.pdf>. [Accessed: 23-Oct-2012].
16. Mari N. 'Diseño de un Sistema de Alerta y Respuesta Temprana a Incendios de Vegetación - SARTiv'. Tesis de Maestría, UNC-CONAE 2012.

17. Mari N., Scavuzzo M.C, Morelli F. 'Diseño de un Sistema de Alerta y Respuesta Temprana a Incendios de Vegetación'. Congreso Argentino de Teledetección 2012. UNC, Córdoba. Septiembre 2012.
18. Cheney, N. P. and Gould, J. S. (1995). Separating fire spread prediction and fire danger rating. *Western Australia Journal of Conservation and Land Management*, 4:3-8.
19. Chandler, C., Cheney, P., Thomas, P., Trabaud, L., and Williams, D. (1983). Fire in forestry. In: *Forest fire behaviour and effects*. John Wiley and Sons.
20. Viney, N. R. (1991). A review of fine fuel moisture modelling. *International Journal of Wildland Fire*, 1:215-234.
21. Sharples, J. J., McRae, R. H. D., Weber, R. O., and Gill, A. M. (2009). A simple index for assessing fuel moisture content. *Environmental Modelling and Software*, 24:637-646.
22. McArthur, A. G. (1967). *Forestry and Timber Bureau Leaflet 107*, Forest Research Institute.
23. Gill, A. M., Christian, K. R., Moore, P. H. R., and Forrester, R. I. (1987). Bushfire incidence, fire hazard and fuel reduction burning. *Australian Journal of Ecology*, 12:299-306.
24. Van Wagner, C. E. (1987). Development and structure of the canadian forest fire weather index system. Technical Report 35, Canadian Forestry Service.
25. Deeming, J. E., Burgan, R. E., and Cohen, J. B. (1977). The national fire-danger rating system-1978. Technical report, USDA Forest Service.
26. Griffiths, D. (1999). Improved formula for the drought factor in mcarthur's forest fire danger meter. *Australian Forest Journal*, 62:202-206.
27. Noble, I. R., Bary, G. A. B., and Gill, A. M. (1980). Mcarthur's fire danger meters expressed as equations. *Australian Journal of Ecology*, 5:201-203.
28. Lighezzolo, A. (2014a). Integración de modelos numéricos de predicción meteorológica en sistemas de alerta temprana a emergencias. PhD thesis, UNC-CONAE.
29. Lighezzolo, A. (2014b). Manual descriptivo sobre la implementación experimental del modelo numérico de predicción del tiempo wrf y sus productos. Manual, CAEARTE- CONAE.
30. Información sobre WRF wrf-model wrf-model-wikipedia.
31. Información sobre GFS global-forecast-system.
32. Información sobre GFS 0.5 degree global-forecast-system-datasets.
33. Manual Advanced Research WRF V. 3 Advanced Research WRF V.3 .

34. Guía del Usuario de ARW ARWUsersGuideV3.
35. Keetch, J. J. and Byram, G. M. (1968). A drought factor index for forest fire control. Research Paper SE 38, USDA Forest Service.
36. Luke, R. H. and McArthur, A. G. (1986). Bushfires in Australia. Australian Government Publishing Service.
37. Snyder, R. L., Spano, D., Duce, P., Baldocchi, D., Xu, L., and Paw, U. K. T. (2006). A fuel dryness index for grassland fire-danger assessment. *Agricultural and Forest Meteorology*, 139:1-11.
38. Crane, W. J. B. (1982). Computing grassland and forest fire behaviour, relative humidity and drought index by pocket calculator. *Australian Forest Journal*, 45:89-97.

