



Título del Trabajo Fin de Máster:

***IMPLEMENTACIÓN DE ÍNDICES PARA
LA EVALUACIÓN DEL RIESGO DE
INCENDIOS FORESTALES EN LA
CABECERA DEL JÚCAR Y ANÁLISIS DE
LAS REPERCUSIONES DEL CAMBIO
CLIMÁTICO EN LOS INCENDIOS***

Intensificación:

ORDENACIÓN, RESTAURACIÓN Y GESTIÓN DE CUENCAS

Autor:

VINCES ALONZO FRANCISCO FABIÁN

Director/es:

DR. MIGUEL ÁNGEL PÉREZ MARTÍN

Fecha: **ABRIL 2014**



Título del Trabajo Fin de Máster:

Implementación de índices para la evaluación del riesgo de incendios forestales en la cabecera del Júcar y análisis de las repercusiones del cambio climático en los incendios.

Autor: **VINCES ALONZO, FRANCISCO FABIÁN**

Tipo	A <input type="checkbox"/> B <input checked="" type="checkbox"/>	Lugar de Realización	VALENCIA
Director	MIGUEL ÁNGEL PÉREZ MARTÍN	Fecha de Lectura	ABRIL 2014
Codirector1			
Codirector2			
Tutor			

Resumen:

Los incendios forestales en la provincia de Cuenca han sido, por muchos años, uno de los principales problemas ambientales en época de verano. La necesidad de realizar una adecuada gestión para la prevención de los mismos, es fundamental para evitar que se produzcan con frecuencia siniestros que tengan consecuencias graves. Para esto, los gestores utilizan herramientas que los ayuden para la prevención de los incendios forestales, como es el caso de los índices de riesgo de incendio.

En el presente estudio, se ha implementado dos índices de riesgo de incendios, el Fire Weather Index (FWI), desarrollado por el Servicio Forestal de Canadá, y el KBDI del Departamento de Agricultura y Servicios Forestales de Estados Unidos, los mismos que fueron formulados para su utilización a tiempo real, con datos diarios de la climatología de la zona.

Inicialmente se analizó una serie diaria de la cabecera del Júcar, con datos desde el año 1994 hasta enero del presente año, con una tendencia a incrementar el riesgo en los meses de verano para los dos índices. Después se evaluó para la misma serie pero de forma mensual, en esta parte del estudio se realizaron modificaciones a los índices para que sus resultados ajusten con los obtenidos de forma diaria, para así, dar por validas dichas modificaciones y presentando una propuesta de modificación para ambos índices de escala diaria a mensual.

Con los índices modificados, se procedió al análisis de la serie histórica mensual desde el año 1940 – 2012, con resultados que reflejaron variantes entre los dos índices, dando una mejor fiabilidad para el índice canadiense FWI, puesto que se ajustaban a las estadísticas de incendios que registra el MAGRAMA a partir del año 1968.

Finalmente se utilizaron dos modelos de circulación global, el HadGEM2-ES y el MPI-ESM-MR, que sirvieron para modelar los escenarios de cambio climático RCP 2.6, 4.5, 6.0 y 8.5, los mismos que dieron como resultado, nuevas series de datos tanto de temperatura como de precipitación según el periodo aplicado (corto, medio y largo). Estos datos fueron la entrada para calcular los índices proyectados a una situación futura.

Como resultado, para los índices aplicados, se obtuvo que para un plazo largo (2070-2090) y

escenario más crítico (RCP 8.5), ambos índices en verano ubican sus valores en la calificación EXTREMA de los mismos, es decir el FWI pasó en verano a tener de una situación ALTA de riesgo de incendios a EXTREMA, mientras que el KBDI, la variación que tuvo fue más evidente aún, de tener en verano una situación de riesgo MODERADO se incrementó a una EXTREMA. Concluyendo que ante un eventual cambio climático el riesgo a que se incremente el número de siniestros a largo plazo es bastante alto

ABSTRACT

For many years, forest fires have been one of the main environmental problems in the province of Cuenca, in the summertime. It is vital that appropriate measures be taken to prevent these fires happening, if the frequent occurrence of serious disasters is to be avoided. To this end, forest managers have a series of aids to help them prevent forest fires, such as fire danger indices.

Two fire danger indices have been used in this study: the Forest Fire Weather Index (FWI) developed by the Canadian Forest Service, and the Keetch-Byram Drought Index (KBDI) used by the US Department of Agriculture's Forest Service, both of which were designed to be used in real time, based on daily weather updates from a given area.

To begin with, daily readings were taken at the Júcar's headwaters, with statistics dating from 1994 to January 2014, with both indices showing an increased risk of fire in the summer months. Readings were then taken for the same period of time, but on a monthly basis. At this point in the study, the indices were modified so that these readings tallied with those taken on a daily basis, thus validating these modifications and providing a model of modification for both indices, on a daily to monthly scale.

Once the indices had been modified, there then followed a breakdown of the monthly historical trend data for the period 1940-2012, with findings showing variations between the two indices, making the Canadian FWI the more reliable index, given that it was consistent with forest-fire statistics recorded by the Spanish Ministry of Agriculture, Food and the Environment (MAGRAMA) since 1968.

Finally, two general circulation models – the HadGEM2-ES and the MPI-ESM-MR – were used to model climate change scenarios RCP 2.6, 4.5, 6.0, and 8.5, yielding new sets of data, both for temperatures and rainfall during a given period (e.g. short-term, medium-term, long-term). This data formed the basis for calculating projected indices in the future.

As a result of applying these indices, it was established that, in the long term (2070-2090), and in the worst-case scenario (RCP 8.5), both indices show values that register as EXTREME, in summer. In other words, the FWI went from a HIGH risk of fires, in the summer, to an EXTREME risk, whilst the variation on the KBDI was even more pronounced, going from MODERATE to EXTREME. It can thus be concluded that, in the event of climate change, the risk of increased occurrence of disasters, in the long term, is quite high.

RESUM

Els incendis forestals en la província de Conca han estat, durant molts anys, un dels principals problemes ambientals en època d'estiu. La necessitat de realitzar una gestió adequada per a previndre'ls és fonamental per a evitar que es produïsquen amb freqüència sinistres que tinguin conseqüències greus. Per això, els gestors utilitzen eines que els ajuden a previndre els incendis forestals, com és el cas dels índexs de risc d'incendi.

En aquest estudi, s'han implementat dos índexs de risc d'incendis: el Fire Weather Index (FWI), desenvolupat pel Servei Forestal de Canadà, i el Keetch-Byram Drought Index (KBDI) del Servei

Forestal del Departament d'Agricultura dels Estats Units, els mateixos que van ser formulats per a utilitzar-los en temps real, amb dades diàries de la climatologia de la zona.

Inicialment s'analitzà una sèrie diària de la capçalera del Xúquer, amb dades des de l'any 1994 fins a gener de 2014, amb una tendència a incrementar el risc en els mesos d'estiu per als dos índexs. Després s'avaluà la mateixa sèrie però de forma mensual; en aquesta part de l'estudi es van realitzar modificacions als índexs perquè els seus resultats s'ajustaren als obtinguts de forma diària, per a, així, donar per vàlides aquestes modificacions i presentar una proposta de modificació per a ambdós índexs d'escala diària a mensual.

Amb els índexs modificats, es va procedir a analitzar la sèrie històrica mensual des de l'any 1940 fins a l'any 2012, amb resultats que van reflectir variants entre els dos índexs, que donaven una millor fiabilitat per a l'índex canadenc FWI, ja que s'ajustaven a les estadístiques d'incendis que registra el Ministeri d'Agricultura, Alimentació i Medi Ambient (MAGRAMA) a partir de l'any 1968.

Finalment es van utilitzar dos models de circulació global, l'HadGEM2-ES i el MPI-ESM-MR, que van servir per a modelar els escenaris de canvi climàtic RCP 2,6; 4,5; 6,0 i 8,5, els mateixos que van donar, com resultat, noves sèries de dades tant de temperatura com de precipitació segons el període aplicat (curt, mitjà i llarg). Aquestes dades van ser l'entrada per a calcular els índexs projectats a una situació futura.

Com resultat, per als índexs aplicats, es va obtenir que, per a un termini llarg (2070-2090) i escenari més crític (RCP 8,5), ambdós índexs, a l'estiu, ubiquen els seus valors en la qualificació EXTREMA, és a dir, el FWI va passar a l'estiu de tindre una situació ALTA de risc d'incendis a una d'EXTREMA, mentres que, quant al KBDI, la variació va ser més evident encara, de tindre a l'estiu una situació de risc MODERAT es va incrementar a una d'EXTREMA. Es conclou, així, que, davant d'un eventual canvi climàtic, el risc que s'incrementa el nombre de sinistres a llarg termini és prou alt.

Palabras clave:

Índices de riesgo de incendio / Incendios Forestales / FWI / KBDI / Cambio Climático

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por haberme acompañado y guiado siempre a lo largo de estos años.

A mis padres Francisco Vincés y Lucciola Alonzo, por todo el amor y la motivación que me han brindado para alcanzar este logro. A mis hermanos Mariuxi y Xavier por ese apoyo incondicional que siempre me prestan.

Al SENESCYT, por el apoyo y financiamiento brindado para mis estudios, apostando por la superación de los profesionales para el crecimiento y desarrollo del Ecuador que nos merecemos.

A mi director, Dr. Miguel Ángel Pérez Martín por su paciencia, disposición, su orientación y sugerencias que fueron fundamentales para concluir con éxito esta investigación.

A todos y cada uno de mis amigos, compañeros y docentes que de una u otra manera sirvieron de ejemplo y ayuda durante esta etapa de mi vida.

TABLA DE CONTENIDOS

LISTA DE GRÁFICOS	III
LISTA DE TABLAS	VII
1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	1
2. ÁMBITO DE ESTUDIO	3
3. ESTADO DEL ARTE	9
3.1 Los Incendios Forestales	9
3.1.1 Principales Impactos de los Incendios Forestales en el Ciclo Hidrológico	10
3.1.2 Medidas Contra los Incendios Forestales	11
3.1.3 Estados del Incendio Forestal	12
3.2 Clasificación de los Índices de Incendios Forestales	14
3.2.1 Índices de Riesgo	14
3.2.1.1. Índices Basados en la Meteorología de la Zona de Estudio	14
3.2.1.2. Índices Basados en el Estado de la Vegetación	15
3.2.2 Índices De Propagación	16
3.2.2.1. Índices Basados en Modelos Probabilísticos	16
3.2.2.2. Índices Basados en Modelos Físicos del Incendio	16
3.2.3 Índices Integrados	17
3.3 Índices de Incendios Forestales para el Caso de Estudio	19
3.3.1 Fire Weather Index (FWI)	19
3.3.2 Keetch and Byram Drought Index (KBDI)	23
3.4 Cambio Climático y los Incendios Forestales	25
3.5 Escenarios de Cambio Climático. Informe AR5 (IPCC)	28
3.6 Los Incendios Forestales en España	32
4. METODOLOGÍA	35
4.1 Análisis Diario	37
4.2 Adaptación Mensual	38
4.2.1. KBDI Mensual	39
4.2.2. FWI Mensual	40
4.3 Cálculo Mensual Serie Histórica	43

4.4 Simulación de Escenarios de Cambio Climático	44
5. APLICACIÓN Y RESULTADOS	47
5.1. Aplicación de índices	47
5.1.1. FWI Diario (1994-2014)	47
5.1.2. KBDI Diario (1994-2014)	48
5.1.3. Análisis de Sensibilidad	50
5.1.3.1. Análisis de Sensibilidad. Temperatura (FWI)	50
5.1.3.2. Análisis de Sensibilidad. Precipitación (FWI)	52
5.1.3.3. Análisis de Sensibilidad. Humedad Relativa (FWI)	54
5.1.3.4. Análisis de Sensibilidad. Velocidad del Viento (FWI)	56
5.1.3.5. Análisis de Sensibilidad. Temperatura y Precipitación (KBDI)	57
5.1.4. Intervalo de Confianza para los Índices FWI y KBDI	59
5.2. Adaptación Mensual de los Índice	63
5.2.1. Fire Weather Index (FWI) 1994-2014 (Datos Mensuales)	63
5.2.2. Keetch And Byram Index (KBDI) 1994-2014 (Datos Mensuales)	65
5.3. Cálculo Mensual (Serie Histórica)	68
5.3.1. FWI Serie Histórica 1940 – 2012	68
5.3.2. KBDI Serie Histórica 1940 – 2012	73
5.3.3. Comparación del FWI y KBDI Serie Histórica 1940-2012 contra los Últimos 32 años Periodo 1980-2012	77
5.4. Simulación de Escenarios de Cambio Climático	78
5.4.1. FWI. Modelo HadGEM2-ES	82
5.4.2. FWI. Modelo MPI-ESM-MR	85
5.4.3. KBDI. Modelo HadGEM2-ES	88
5.4.4. KBDI. Modelo MPI-ESM-MR	92
5.4.5. Síntesis de Resultados	95
6. CONCLUSIONES	97
7. LÍNEAS FUTURAS	101
8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	103

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Ubicación de la zona de estudio. Cabecera del Júcar	3
Gráfico 2. Evolución de los incendios forestales en la provincia de Cuenca 1968-2013. Número de siniestros, Superficie quemada en hectáreas (arbolada y no arbolada)	6
Gráfico 3. Esquema de los estados del incendio forestal.....	13
Gráfico 4. Capas del suelo que intervienen en el cálculo de los códigos de humedad del combustible	20
Gráfico 5. Estructura del Fire Weather Index (FWI)	20
Gráfico 6. Valores del FWI del 31 de Julio del 2013 en Canadá	22
Gráfico 7. Estructura Del Keetch and Byram Drought Index (KBDI)	23
Gráfico 8. Información del KBDI para una estación el estado de Texas.	24
Gráfico 9. Cambio porcentual en el número anual previsto de voxels (es decir, latitud × longitud × mes) con al menos un incendio > 200 ha para la región (arriba) (California + estados vecinos) y (abajo) California sólo	27
Gráfico 10. Series de tiempo de cambio de la temperatura con respecto a 1986-2005 un promedio de más puntos de la rejilla de la tierra en la región de Europa del Sur / Mediterráneo. Meses de Verano	28
Gráfico 11. Mapas de los cambios de temperatura en 2016-2035, 2046-2065 y 2081-2100 con respecto a 1986-2005 en el escenario RCP4.5. Para cada punto, se muestran los percentiles 25, 50 y 75% de la distribución del conjunto CMIP5; esto incluye tanto la variabilidad natural y entre modelos propagación. Eclosión indica áreas donde los 20 años las diferencias de medias de los percentiles son menores que la desviación estándar de la actual variabilidad natural estimadas por el modelo de 20 años las diferencias de medias	29
Gráfico 12. Series de tiempo de cambio relativo con respecto a 1986-2005 en la precipitación promediada sobre puntos de la rejilla de la tierra en la región de Europa del Sur / Mediterráneo. Primavera/Verano	30
Gráfico 13. Mapas de los cambios de precipitación en 2016-2035, 2046-2065 y 2081-2100 con respecto a 1986-2005 en el escenario RCP4.5. Para cada punto, se muestran los 25, 50 y 75a percentiles de la distribución del conjunto CMIP5; esto incluye tanto la variabilidad natural y entre modelos propagación. Eclosión indica áreas donde los 20 años las diferencias de medias de los percentiles son menores que la desviación estándar de la actual variabilidad natural estimadas por el modelo de 20 años las diferencias de medias	30
Gráfico 14. Estadísticas de incendios forestales en España (1994-2013)	33



Gráfico 15. Esquema de la metodología desarrollada para el presente estudio.	
Etapas 1 y 2	35
Gráfico 16. Esquema de la metodología desarrollada para el presente estudio.	
Etapas 3 y 4	36
Gráfico 17. Esquema de la etapa de aplicación de índices a escala diaria.....	37
Gráfico 18. Esquema de la etapa de adaptación de los índices a escala mensual	38
Gráfico 19. Esquema de la etapa de cálculo de la serie histórica mensual 1940-2012 en la cabecera del Júcar	43
Gráfico 20. Esquema de la etapa de simulación de escenarios de cambio climático, integrada con la etapa de cálculo de la serie histórica mensual 1940-2012 en la cabecera del Júcar	45
Gráfico 21. Valores diarios del FWI en la cabecera del Júcar (1994-2014)	47
Gráfico 22. Valores medios del FWI en la cabecera del Júcar (1994-2014)	48
Gráfico 23. Valores diarios del KBDI en la cabecera del Júcar (1994-2014)	49
Gráfico 24. Valores medios del KBDI en la cabecera del Júcar (1994-2014)	49
Gráfico 25. Análisis de sensibilidad de la temperatura en el FWI.....	50
Gráfico 26. Análisis de sensibilidad de la precipitación en el FWI	52
Gráfico 27. Análisis de sensibilidad de la humedad relativa en el FWI	54
Gráfico 28. Análisis de sensibilidad de la velocidad del viento en el FWI	56
Gráfico 29. Análisis de sensibilidad de la temperatura en el KBDI	57
Gráfico 30. Análisis de sensibilidad de la precipitación en el KBDI	58
Gráfico 31. Intervalo de confianza del FWI – media +/- desviación estándar	60
Gráfico 32. Intervalo de confianza del FWI – media +/- 2 desviaciones estándar.....	60
Gráfico 33. Intervalo de confianza del FWI – valores mínimos y máximos	60
Gráfico 34. Intervalo de confianza del KBDI – valores mínimos y máximos	62
Gráfico 35. Valores mensuales del FWI. Serie 1994 – 2014	63
Gráfico 36. FWI diario vs. FWI mensual ajustado	64
Gráfico 37. FWI diario vs. FWI mensual ajustado (meses de verano)	64
Gráfico 38. Valores mensuales del KBDI. Serie 1994 – 2014	65
Gráfico 39. KBDI diario vs. KBDI mensual ajustado	66
Gráfico 40. KBDI diario vs. KBDI mensual ajustado (meses de verano)	66
Gráfico 41. FWI mensual (serie histórica 1940 – 2012)	68



Gráfico 42. FWI media anual (serie histórica 1940 – 2012) vs. Número de incendios en la provincia de cuenca (1968 – 2013)	69
Gráfico 43. FWI media anual (serie histórica 1940 – 2012) vs. Superficie forestal total quemada en la provincia de cuenca (1968 – 2013)	69
Gráfico 44. FWI máximo anual (serie histórica 1940 – 2012) vs. Número de incendios en la provincia de cuenca (1968 – 2013)	70
Gráfico 45. FWI máximo anual (serie histórica 1940 – 2012) vs. Superficie forestal total quemada en la provincia de cuenca (1968 – 2013)	70
Gráfico 46. FWI media anual verano (serie histórica 1940 – 2012) vs. Número de incendios en la provincia de cuenca (1968 – 2013)	70
Gráfico 47. FWI media anual verano (serie histórica 1940 – 2012) vs. Superficie forestal total quemada en la provincia de cuenca (1968 – 2013)	71
Gráfico 48. Intervalo de confianza del FWI serie histórica 1940 – 2012 – media +/- desviación estándar	72
Gráfico 49. Intervalo de confianza del FWI serie histórica 1940 – 2012 – media +/- 2 desviaciones estándar	72
Gráfico 50. Intervalo de confianza del FWI serie histórica 1940 – 2012 – mínimos y máximos	72
Gráfico 51. KBDI mensual (serie histórica 1940 – 2012)	73
Gráfico 52. KBDI anual (serie histórica 1940 – 2012) vs. Número de incendios en la provincia de cuenca (1968 – 2013)	74
Gráfico 53. KBDI anual (serie histórica 1940 – 2012) vs. Superficie forestal total quemada en la provincia de cuenca (1968 – 2013)	74
Gráfico 54. KBDI máximo anual (serie histórica 1940 – 2012) vs. Número de incendios en la provincia de cuenca (1968 – 2013)	75
Gráfico 55. KBDI máximo anual (serie histórica 1940 – 2012) vs. Superficie forestal total quemada en la provincia de cuenca (1968 – 2013)	75
Gráfico 56. KBDI media anual verano (serie histórica 1940 – 2012) vs. Número de incendios en la provincia de cuenca (1968 – 2013)	75
Gráfico 57. KBDI media anual verano (serie histórica 1940 – 2012) vs. Superficie forestal total quemada en la provincia de cuenca (1968 – 2013)	76
Gráfico 58. Intervalo de confianza del KBDI serie histórica 1940 – 2012 – mínimos y máximos	76
Gráfico 59. FWI serie histórica 1940 – 2012 vs FWI 1980 – 2012	77



Gráfico 60. KBDI serie histórica 1940 – 2012 vs KBDI 1980 – 2012	77
Gráfico 61. Comparativa del FWI de la serie histórica con los escenarios del modelo HadGEM2-ES a corto plazo (2010 – 2030)	82
Gráfico 62. Comparativa del FWI de la serie histórica con los escenarios del modelo HadGEM2-ES a medio plazo (2040 – 2060)	83
Gráfico 63. Comparativa del FWI de la serie histórica con los escenarios del modelo HadGEM2-ES a largo plazo (2070 – 2090)	84
Gráfico 64. Comparativa del FWI de la serie histórica con los escenarios del modelo MPI-ESM-MR a corto plazo (2010 – 2030)	85
Gráfico 65. Comparativa del FWI de la serie histórica con los escenarios del modelo MPI-ESM-MR a medio plazo (2040 – 2060)	85
Gráfico 66. Comparativa del FWI de la serie histórica con los escenarios del modelo MPI-ESM-MR a largo plazo (2070 – 2090)	86
Gráfico 67. Comparativa del KBDI de la serie histórica con los escenarios del modelo HadGEM2-ES a corto plazo (2010 – 2030)	88
Gráfico 68. Comparativa del KBDI de la serie histórica con los escenarios del modelo HadGEM2-ES a medio plazo (2040 – 2060)	89
Gráfico 69. Comparativa del KBDI de la serie histórica con los escenarios del modelo HadGEM2-ES a largo plazo (2070 – 2090)	90
Gráfico 70. Comparativa del KBDI de la serie histórica con los escenarios del modelo MPI-ESM-MR a corto plazo (2010 – 2030)	92
Gráfico 71. Comparativa del KBDI de la serie histórica con los escenarios del modelo MPI-ESM-MR a medio plazo (2040 – 2060)	92
Gráfico 72. Comparativa del KBDI de la serie histórica con los escenarios del modelo MPI-ESM-MR a largo plazo (2070 – 2090)	93



LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Estadísticas de incendios forestales 1968-2013 en la provincia de cuenca	5
Tabla 2. Resumen de la clasificación de Índices de Incendios Forestales	14
Tabla 3. Clasificación original de riesgo de incendio para el FWI (Canadá)	21
Tabla 4. Clasificación modificada de riesgo de incendio para el FWI (Portugal)	22
Tabla 5. Clasificación original del riesgo de incendio del KBDI	24
Tabla 6. Estadísticas de incendios forestales en España (1994-2013)	32
Tabla 7. Clasificación del riesgo de incendio en el KBDI	48
Tabla 8. Valores porcentuales del análisis de sensibilidad de la temperatura en el FWI	51
Tabla 9. Valores medios mensuales de temperatura que se variaron para análisis de sensibilidad en el FWI	51
Tabla 10. Valores porcentuales del análisis de sensibilidad de la precipitación en el FWI	53
Tabla 11. Valores medios mensuales de precipitación que se variaron para análisis de sensibilidad en el FWI	53
Tabla 12. Valores porcentuales del análisis de sensibilidad de la humedad relativa en el FWI	55
Tabla 13. Valores medios mensuales de humedad relativa que se variaron para análisis de sensibilidad en el FWI	55
Tabla 14. Valores porcentuales del análisis de sensibilidad de la velocidad del viento en el FWI	56
Tabla 15. Valores medios mensuales de velocidad del viento que se variaron para análisis de sensibilidad en el FWI	57
Tabla 16. Valores porcentuales del análisis de sensibilidad de la temperatura en el KBDI	58
Tabla 17. Valores porcentuales del análisis de sensibilidad de la precipitación en el KBDI	59
Tabla 18. Valores del intervalo de confianza del FWI – media +/- desviación estándar	61
Tabla 19. Valores del intervalo de confianza del FWI – media +/- 2 desviaciones estándar	61
Tabla 20. Valores del intervalo de confianza del FWI – mínimos y máximos	61



Tabla 21. Valores del intervalo de confianza del KBDI – mínimos y máximos	62
Tabla 22. Anomalías de Temperatura en la cabecera del Júcar. Corto Plazo (2010-2030)	78
Tabla 23. Anomalías de Temperatura en la cabecera del Júcar. Medio Plazo (2040-2060)	79
Tabla 24. Anomalías de Temperatura en la cabecera del Júcar. Largo Plazo (2070-2090)	79
Tabla 25. Anomalías de Precipitación en la cabecera del Júcar. Corto Plazo (2010-2030)	80
Tabla 26. Anomalías de Precipitación en la cabecera del Júcar. Medio Plazo (2040-2060)	80
Tabla 27. Anomalías de Precipitación en la cabecera del Júcar. Largo Plazo (2070-2090)	81
Tabla 28. Variaciones del FWI en verano con los escenarios del modelo HadGEM2-ES a corto plazo (2010 – 2030)	83
Tabla 29. Variaciones del FWI en verano con los escenarios del modelo HadGEM2-ES a medio plazo (2040 – 2060)	84
Tabla 30. Variaciones del FWI en verano con los escenarios del modelo HadGEM2-ES a largo plazo (2070 – 2090)	84
Tabla 31. Variaciones del FWI en verano con los escenarios del modelo MPI-ESM-MR a corto plazo (2010 – 2030)	86
Tabla 32. Variaciones del FWI en verano con los escenarios del modelo MPI-ESM-MR a medio plazo (2040 – 2060)	86
Tabla 33. Variaciones del FWI en verano con los escenarios del modelo MPI-ESM-MR a largo plazo (2070 – 2090)	87
Tabla 34. Variaciones del KBDI en verano con los escenarios del modelo HadGEM2-ES a corto plazo (2010 – 2030)	88
Tabla 35. Variaciones del KBDI en verano con los escenarios del modelo HadGEM2-ES a medio plazo (2040 – 2060)	89



Tabla 36. Variaciones del KBDI en verano con los escenarios del modelo HadGEM2-ES a largo plazo (2070 – 2090) 90

Tabla 37. Variaciones del KBDI en verano con los escenarios del MPI-ESM-MR a corto plazo (2010 – 2030) 93

Tabla 38. Variaciones del KBDI en verano con los escenarios del MPI-ESM-MR a medio plazo (2040 – 2060) 94

Tabla 39. Variaciones del KBDI en verano con los escenarios del MPI-ESM-MR a largo plazo (2070 – 2090) 94

Tabla 40. Variaciones del FWI en verano para cada modelo, escenario y plazo modelado 95

Tabla 41. Variaciones del KBDI en verano para cada modelo, escenario y plazo modelado 95

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

España cuenta con una superficie forestal bastante extensa (25 millones de hectáreas), la cual, el 50% es superficie arbolada. Las variaciones que presenta el clima y junto con la fisiografía que presenta el territorio español, es posible la vida de una gran diversidad de ecosistemas y una alta biodiversidad de especies animales y vegetales (Pérez 2004).

Los incendios forestales, debido al incremento de la frecuencia e intensidad en los últimos años, se han convertido en uno de los mayores problemas ecológicos que están presentando los bosques en España. Dicha intensidad y recurrencia están teniendo efectos cada vez más graves sobre el suelo, algunos de estos, con efectos irreversibles (GREENPEACE 2013).

La frecuencia del fuego conlleva a restringir la capacidad de la vegetación de recolonizar el terreno o revestir el suelo. Las elevadas pendientes aumentan además la erosión generando suelos cada vez menos productivos. Sequías, inundaciones, colmatación de embalses son algunas de las consecuencias del paso repetido del fuego en los bosques.

En lo que respecta al cambio climático, sus consecuencias y efectos en Europa serán de un incremento en las sequías, más inundaciones y más incendios forestales tanto a corto como a medio plazo. Esta alerta fue lanzada desde el Panel Intergubernamental de la ONU sobre Cambio Climático (IPCC), en base al último informe (AR5) presentado.

El cambio climático provocará un incremento de las restricciones de agua debido a la "significativa reducción de la extracción de los ríos y de acuíferos subterráneos" combinado con el aumento de la demanda para irrigación, energía e industria y uso doméstico (Stocker, Dahe et al. 2013). Este proceso se intensificará en determinadas áreas del continente debido una mayor pérdida de agua a través de la evaporación natural, "particularmente en el sur de Europa", precisa el documento.

En España se registran cada año más de 20.000 incendios forestales, que afectan a más de 150.000 hectáreas repartidas por toda su geografía. Los incendios se dan principalmente en verano y son causados por las personas, en su mayoría de forma accidental. Los incendios se ven favorecidos por vegetación inflamable y condiciones climáticas desecantes (alta temperatura, baja humedad relativa del aire, sequía). Los incendios han sido más numerosos bajo altas temperaturas o índices de peligro y bajas precipitaciones, siendo las situaciones anómalas extremas más importantes que las medias (Moreno, De la Rosa et al. 2005).



El presente trabajo tiene como objetivo general establecer una metodología de análisis de la incidencia que tiene el cambio climático sobre los incendios forestales, mediante la evaluación de datos históricos mensuales utilizados en dos índices de riesgo de incendios, y así poder aplicarla a la cabecera del Júcar, que será nuestro ámbito de estudio.

Para esto, será necesario cumplir con los objetivos específicos detallados a continuación:

- Analizar los índices de riesgo de incendios forestales: Keetch-Byram Drought Index (KBDI) – **E.E.U.U.** y Fire Weather Index (FWI) – **Canadá**. (Keetch and Byram 1968, Van Wagner 1974), con datos mensuales observados, principalmente precipitación y temperatura, de la cabecera del Júcar y con ello determinar la escala de valores de riesgo para las diferentes épocas del año.
- Evaluar mediante la utilización de datos obtenidos por modelos de cambio climático del informe AR5, aplicados en un caso de estudio. Esto nos permitirá contrastar los resultados simulados con los observados para poder definir la variación que tendrá el clima en un escenario futuro y, si dichos cambios tendrán repercusión en el posible aumento del riesgo de incendios forestales.

2. ÁMBITO DE ESTUDIO

Para el presente estudio la zona que se eligió fue la Cabecera del Júcar, perteneciente a la Demarcación Hidrográfica del Júcar (DHJ), la misma que limita con las demarcaciones del Ebro y del Segura al norte y sur respectivamente y del Tajo, Guadiana y Guadalquivir al oeste, bordeando al este con el Mediterráneo. La superficie total del territorio de la demarcación es de 42.735 km².

Este ámbito se extiende dentro de cinco Comunidades Autónomas (Aragón, Castilla-La Mancha, Cataluña, Comunidad Valenciana y Región de Murcia) y de siete provincias: la totalidad de Valencia, gran parte de Albacete, Alicante, Castellón, Cuenca y Teruel, una pequeña zona de Tarragona y una zona muy pequeña de Murcia. Y es justamente la provincia de Cuenca en donde se asienta la zona en estudio.

El clima de la provincia de Cuenca se divide en dos tipos: uno es Mediterráneo templado, con influencia al noreste del tipo Mediterráneo templado fresco, y otro: situado al suroeste del Mediterráneo continental templado. Las lluvias son constantes y frecuentes en toda la provincia, alcanzando precipitaciones superiores a los 500 mm.

En el gráfico 1 se muestra la ubicación de la cabecera del Júcar, los datos que se tomaran en cuenta para el presente estudio provienen del Embalse Alarcón, los mismos serán de precipitación y temperatura, en una serie histórica mensual que va desde el año 1940 hasta el 2012.



Gráfico 1. Ubicación de la zona de estudio. Cabecera del Júcar. FUENTE: www.chj.es

En Castilla-La Mancha la lucha por contrarrestar el impacto de los incendios forestales, ocupa una de las mayores preocupaciones tanto para los políticos responsables como para los encargados de la gestión forestales. Este problema, es desde hace algunos años, objeto fundamental en la planificación de las actuaciones forestales. El clima incide de forma determinante en la iniciación y propagación de los incendios, a través de factores determinantes como son precipitación, temperatura, velocidad y dirección del viento, humedad relativa del aire y tormentas secas estivales.

En Castilla-La Mancha el clima se caracteriza por ser árido y continental, con medias anuales de precipitaciones que van desde 400 hasta 600mm. Las precipitaciones estivales son con frecuencia de carácter convectivo y acompañadas de tormentas de fuerte aparato eléctrico, aquí la repercusión del rayo en el número de incendios toma gran importancia, particularmente en comarcas muy forestales como son la Serranía Baja de Cuenca y Alcarria Alta. Mientras que las precipitaciones estacionales ofrecen una gran diferencia de unas épocas a otras dentro del año.

La humedad relativa del aire, tiene una estrecha relación con la precipitación, la cual influye de manera directa sobre el grado de humedad del combustible. Sus variaciones se presentan tanto horaria como estacionalmente, y el conocimiento de su oscilación a lo largo del día determina, en muchas ocasiones, la estrategia del empleo de los medios en las horas más favorables para atajar la propagación del incendio. Por lo general, coincide con las horas de madrugada.

La temperatura tiene una importancia primordial en la iniciación y evolución de los incendios. Datos estadísticos de la zona de estudio, en series suficientemente representativas, nos han indicado que se llegan a alcanzar e incluso a superar los 45º durante los meses de verano en diversas ocasiones y que en Julio, el mes más cálido, presenta temperaturas medias que en muchas áreas se elevan hasta los 26º. Con respecto al viento, Cuenca es una de las provincias en las que predominan los vientos provenientes del Oeste, pero debido al carácter continental de esta región, la dirección del viento no ejercen mucha influencia en la evolución y peligrosidad de los incendios como en otras regiones, dependen más de su velocidad.

Junto con los factores climáticos están los circunstanciales, como la incorporación de grandes áreas de terrenos agrícolas marginales conformados por matorrales pirofíticos, y que han sido abandonados al cultivo debido a la falta de rentabilidad económica, y que contribuyen a que los incendios en la zona sean de gran peligrosidad y difíciles de controlar una vez iniciados. En la tabla 1 que se presenta a continuación, muestra las estadísticas de incendios forestales desde el año 1968 hasta la actualidad, 2013, de la provincia de Cuenca.



AÑO	NÚM. DE SINIESTRO	SUPERFICIE AFECTADA EN HECTAREAS		
		ARBOLADA	DESARBOLADA	TOTALES
1968	31	623.4	81.1	704.5
1969	13	227.7	26.5	254.2
1970	40	1,135.9	428.8	1,564.7
1971	21	48.9	31.2	80.1
1972	20	43.2	12.4	55.6
1973	33	63.7	8.6	72.3
1974	40	108.7	14.2	122.9
1975	46	153.7	19.7	173.4
1976	63	70.4	26.2	96.6
1977	26	59.8	17.6	77.4
1978	67	1,036.7	90.4	1,127.1
1979	34	597.6	22.9	620.5
1980	100	244.9	207.2	452.1
1981	157	7,566.0	1,686.5	9,252.5
1982	71	1,381.6	2,377.2	3,758.8
1983	93	802.1	267.6	1,069.7
1984	61	826.9	527.0	1,353.9
1985	115	979.3	394.1	1,373.4
1986	67	269.2	52.1	321.3
1987	92	613.2	709.5	1,322.7
1988	68	198.5	72.4	270.9
1989	105	156.5	146.8	303.3
1990	199	3,212.8	527.7	3,740.5
1991	207	6,364.7	1,159.7	7,524.4
1992	134	434.2	34.9	469.1
1993	113	116.3	521.7	638.0
1994	176	16,875.7	2,503.6	19,379.3
1995	116	101.7	35.4	137.1
1996	126	115.6	71.2	186.8
1997	115	33.8	3.9	37.7
1998	61	42.9	59.9	102.8
1999	143	333.4	133.7	467.1
2000	115	1,184.8	721.3	1,906.1
2001	102	125.3	222.3	347.6
2002	149	56.0	116.6	172.6
2003	144	1,792.6	1,880.8	3,673.3
2004	200	1,001.3	360.4	1,361.8
2005	212	332.0	566.6	898.6
2006	132	140.1	38.4	178.4
2007	114	30.7	144.8	175.5
2008	125	29.5	129.7	159.2
2009	177	4,299.0	287.3	4,586.4
2010	96	6.7	15.1	21.8
2011	148	293.5	131.7	425.3
2012	303	687.3	64.7	751.9
2013	146	36.8	61.5	98.3

Tabla 1. Estadísticas de incendios forestales 1968-2013 en la provincia de cuenca. FUENTE: MAGRAMA

Se puede observar que los años en los que más siniestros hubieron son en 1990-1991; 2003-2004 y el 2012 que es el año en el cuál hubo más números de siniestros, 303, pero no necesariamente fueron los años en donde los mismos fueron más graves, puesto que los años 1981-1982; 1991; 1994 y 2009, presentaron un número mayor de hectáreas afectadas, siendo el año 1994 el más alto con más de 19,000 hectáreas forestales quemadas (MAGRAMA 2014).

En el gráfico 2 se presenta la evolución de los incendios forestales en Cuenca para la serie de años antes mencionada.

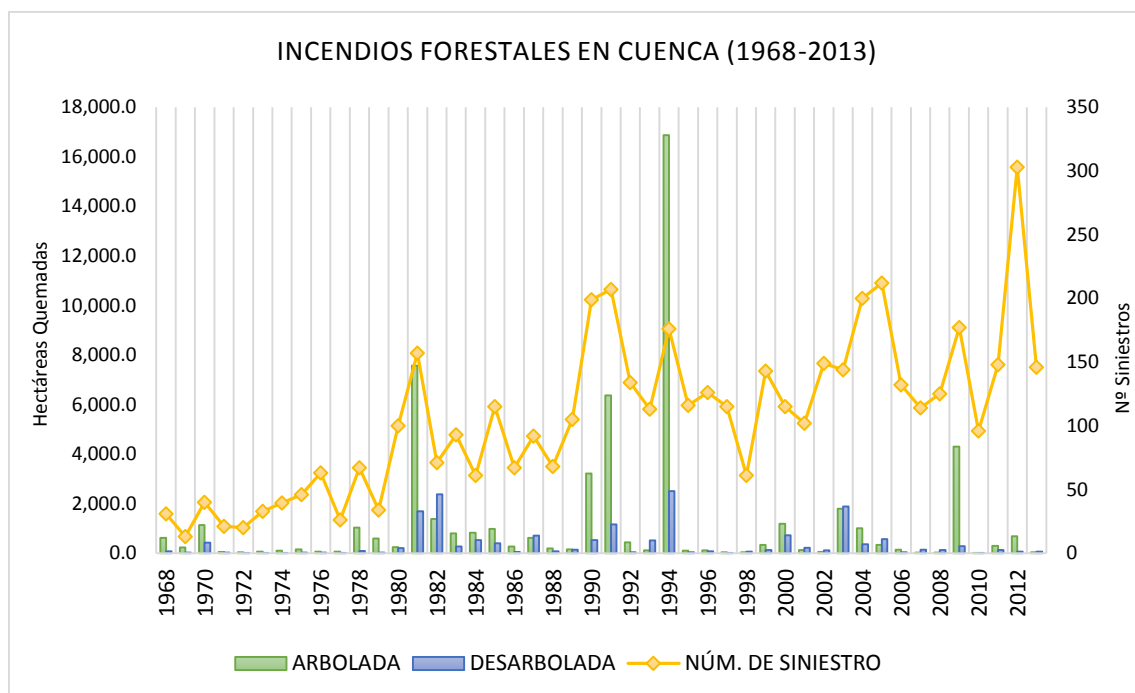


Gráfico 2. Evolución de los incendios forestales en la provincia de Cuenca 1968-2013. Número de siniestros, Superficie quemada en hectáreas (arbolada y no arbolada). FUENTE: MAGRAMA

Si hablamos de cifras en Comunidad Autónoma de Castilla-La Mancha y las contrastamos con la estadística nacional se pone de manifiesto las siguientes diferencias:

- El gran número de incendios por negligencias en Castilla-La Mancha, que superan el 50% de la siniestralidad frente a menos del 18 % del resto de España.
- La gran incidencia del rayo como causa de incendios, 16% de la siniestralidad en Castilla-La Mancha, frente a menos de un 4% del resto de España.
- El bajo porcentaje de los incendios intencionados de la región, 20%, frente a más del 60% del Estado.



En síntesis, cabe hacer énfasis a la dificultad que representa bajar el número de siniestros. La causa radica en que los factores que presentan una mayor incidencia en su inicio y desarrollo, o escapan del control del gestor, como por ejemplo las condiciones atmosféricas, topografía, despoblamiento de territorios forestales, o requieren de un periodo de tiempo extenso y grandes recursos para ser modificados, tal es el caso de la capacitación a la población en el tema del respeto a la naturaleza, el cambio de hábitos de la población rural y sobre todo las actuaciones encaminadas a modificar la estructura y naturaleza de los combustibles forestales.

3. ESTADO DEL ARTE

3.1 LOS INCENDIOS FORESTALES.

El incendio forestal es un fuego que se propaga sin control alguno, sobre un ecosistema forestal y cuya quema no desempeña ninguna función u objetivo de gestión, por lo tanto demanda trabajos de extinción. Es un fenómeno no deseado en el que se producen consecuencias económicas y ecológicas calificadas como daños y perjuicios (Frost and Sweeney 2000).

Las áreas forestadas y bosques tienen un papel fundamental para el mantenimiento de la vida alrededor del planeta. Las plantas y árboles son importantes para todo tipo de vida en el planeta y su calidad. Son el medio ambiente natural donde habitan diferentes especies tanto de animales, plantas, árboles así como también de grupo de personas, aunque cada vez menos. Hoy en día, algunas de estas áreas, consideradas de gran importancia para recursos económicos en todo el mundo, contienen importantes áreas llamadas “reservas verdes” debido a la importancia que tienen sus bosques en el mantenimiento de la calidad del aire (Bianchini 2006).

Los incendios forestales forman parte de un balance ecológico del planeta, el cual permite, de forma natural, la regeneración de la vegetación y los árboles, dando paso a, que las poblaciones viejas sean destruidas por el fuego, teniendo como resultado un suelo en condiciones favorables para el nacimiento de nueva y tal vez productiva vegetación (White, Ryan et al. 1996).

Temporadas secas, combustibles secos, tormentas eléctricas, volcanes en erupción, terremotos, son distintos factores que pueden provocar incendios forestales la combinación de los mismos provocan el comienzo de fuegos y la devastación de posiblemente bosques enteros, así como también, de áreas forestadas. Siempre que la cantidad de incendios de este tipo sea baja, o bien esté dentro de los rangos considerados como naturales, éstos pueden ser una oportunidad para la formación de nueva vida, manteniendo la flora y fauna dentro de un escenario natural (Denham 2009). Desafortunadamente, durante los últimos años, el aumento de un número de este tipo de incendios forestales rompe el balance que naturalmente ellos significan (MAGRAMA 2014).

3.1.1 PRINCIPALES IMPACTOS DE LOS INCENDIOS FORESTALES EN EL CICLO HIDROLÓGICO

La erosión del suelo es uno de los impactos más negativos para el medio ambiente que pueden desencadenar los incendios forestales, sobre todo aquellos difíciles de controlar y que llegan a tener una alta intensidad. En condiciones normales, la erosión es controlada por el potencial erosivo de la lluvia, que depende de su impacto directo sobre el suelo. Este impacto, está en función de la intensidad de la lluvia y la capacidad que tenga para mover partículas en el suelo. Por lo que depende, esencialmente, de la cantidad de lluvia caída y que no se infiltra. El efecto del fuego sobre la erosión está, por lo tanto, muy ligado al efecto sobre el ciclo hidrológico (Shakesby, Coelho et al. 1993).

Dentro de una comunidad vegetal, las gotas de lluvia son interceptadas por la vegetación y entonces o bien caen sobre el suelo amortizadas debido a la intercepción previa o llegan a evaporarse desde la vegetación (Bucini and Lambin 2002). Cuando la lluvia alcanza el suelo es absorbida por la hojarasca hasta llegar a un estado de saturación, lo que depende en gran parte al terreno y su capacidad de retención de agua, lo que se encuentra relacionado con su contenido en materia orgánica, el exceso de agua se infiltra, llegando a penetrar hasta los horizontes minerales del suelo. Cuando esto ocurre, parte es retenida por las partículas minerales o en los poros capilares finos, por tensión superficial, y otra parte se infiltra hacia abajo (agua de infiltración) a través de los poros gruesos, y puede alcanzar la capa freática. Si la cantidad de agua que llega a la superficie es mayor que la cantidad que se infiltra, el exceso fluye por la superficie, bajo la fuerza de la gravedad, constituyendo la llamada agua de escorrentía (Robichaud 2000).

Por otra parte, el agua del suelo se pierde por evaporación desde la superficie y por la transpiración de las plantas, que la toman de las capas más profundas por medio de las raíces (Viro 1974).

Los incendios forestales afectan a todos estos procesos del ciclo hidrológico. Cuando la cubierta vegetal es eliminada por el fuego, la intercepción, así como la transpiración, disminuyen, y la evaporación desde el suelo aumenta debido a que su superficie, desprovista de vegetación, queda expuesta a la insolación y al viento. Además, el ennegrecimiento de su superficie por culpa del fuego, contribuye a la evaporación porque hace incrementar la absorción de la radiación y, en consecuencia, la temperatura del suelo aumenta (Scott and Van Wyk 1990).

El conjunto de impacto de estos procesos en el ciclo hidrológico incidirán principalmente en (Anderson, Hoover et al. 1976):

- **La Desertificación**, debido a que el fuego afecta directamente a la vegetación, suelo, y a la fauna con menos movilidad. Los ecosistemas que se queman, de forma parcial o total, no regeneran una cobertura vegetal hasta después de varios meses, incluso años. El suelo descubierto queda expuesto a la erosión eólica y pluvial, sufriendo una degradación en su capa superficial. Después del incendio durante uno o dos años, las cuencas tienen un riesgo de inundaciones y de aterramientos muy superior al de las cuencas no quemadas, y estos riesgos se extienden fuera de las zonas afectadas en forma de posibles daños a infraestructuras y población (deslizamientos de tierra). (Vallejo and Valdecantos 2006).
- **Riesgo de Inundaciones**, al producirse una disminución de la vegetación por parte de los incendios forestales, el suelo pierde la intercepción previa que hace dicha vegetación a la lluvia, por lo que el suelo queda expuesto a una saturación más rápida y un eventual aumento en el riesgo de inundaciones.
- **Menor recarga de acuíferos**, Al existir menos cobertura vegetal y de árboles en la superficie debido a los incendios, presenta un escenario de cambio con respecto a la disminución de la recarga de fuentes hídricas subterráneas, necesarias para el abastecimiento de agua.
- **Colmatación de Embalses**, Los terrenos deforestados por los incendios están sometidos al impacto de las gotas de lluvia, por lo que se incrementa la erosión (puede eliminarse totalmente la tierra vegetal), con una consecuente colmatación de embalses a causa del arrastre de materiales detríticos.

3.1.2 MEDIDAS CONTRA LOS INCENDIOS FORESTALES

Debido a las consecuencias cada vez más graves de los incendios forestales, los gestores tanto técnicos como políticos, deben tomar medidas principalmente en dos direcciones (Denham 2009):

- **PREVENCIÓN**. Actuaciones que van dirigidas a prevenir la aparición de incendios forestales y a disminuir el potencial impacto de los que aparezcan, mediante la creación de infraestructuras, trabajos selvícolas, etc.
- **EXTINCIÓN**. Actuaciones encaminadas a dotar y distribuir, medios e infraestructuras, al territorio para extinguir los incendios

Esto hace que el gestor necesite de una herramienta que le diga DÓNDE, CUÁNDO Y CÓMO se desarrollará un incendio, de manera que se pueda optimizar las decisiones anteriores.

Sin embargo, resulta muy difícil tanto modelizar un incendio como prevenirlo, debido al gran número de factores que concurren en él, así como su dinamicidad y estacionalidad. Es por esto, que se han desarrollado una serie de índices de riesgo de incendio, los cuales, se han centrado en satisfacer independientemente diferentes necesidades tanto de prevención, extinción y gestión, por lo tanto, en distintos aspectos del incendio (Vicente 2007):

- Probabilidad de inicio
- Potencial destructivo (comportamiento)
- Consecuencias totales del mismo

3.1.3 ESTADOS DEL INCENDIO FORESTAL

A pesar de no existir una definición exacta del riesgo, la literatura anglosajona mediante varios artículos y revistas científicas (Bucini and Lambin 2002, Hardy 2005), puntualizan tres términos que se emplean casi indistintamente: HAZARD, RISK, DANGER. No obstante, en general, la mayoría de los índices desarrollados entre los 80 y 90 responden a la siguiente clasificación de los estados que presenta antes, durante y después el incendio forestal:

- **Riesgo de incendio / FIRE RISK.** Probabilidad de que se inicie un incendio en un determinado lugar y tiempo, considerando la naturaleza e incidencia de los agentes causantes. (Aparición del Incendio).

La mayoría de los índices de riesgo desarrollados en los años 80, y que no constituyen un sistema de predicción más complejo, responden a esta metodología, centrada en las causas que originan los incendios y sus probabilidades, independientemente del poder destructivo del incendio. Suelen ser índices sencillos, cuya formulación responde a criterios estadísticos o matemáticos y en la que los datos de entrada se terminan integrando en una fórmula para obtener un resultado global.

- **Amenaza de incendio / FIRE HAZARD.** Mide el riesgo a partir del combustible disponible, considera la cantidad, tipo, contenido en humedad, etc. (Desarrollo del Incendio).

A este concepto responden algunos de los índices desarrollados y que miden la facilidad con que los combustibles pueden arder, o bien el comportamiento de un fuego potencial en un ecosistema concreto, en función del modelo de combustible existente y la meteorología. Tradicionalmente muchos de los índices han respondido a esta idea de peligro o riesgo meteorológico de incendios.

- **Peligro de incendio / FIRE DANGER.** Relaciona componentes estructurales y dinámicos los cuales afectan a la ignición y propagación, así como a la dificultad de extinción que presente el incendio.

El más integral de los tres conceptos y, en cierto modo, integra los dos anteriores. En base a él se han desarrollado varios de los índices de riesgo más completos, como el sistema de peligro de incendio desarrollado por el JOINT RESEARCH CENTER de Europa.

- **Riesgo avanzado de incendios: VULNERABILIDAD.** La idea de riesgo es muy extensa, por lo que va ligada, no sólo al fenómeno que provoca el riesgo sino, también, a los daños que provoca el mismo.

En igualdad de condiciones en cuanto a la probabilidad de que se inicie un incendio y del potencial destructivo del mismo, al gestor no le resultará de igual importancia que se queme un parque natural que una zona no protegida o que se queme una zona cercana a urbanizaciones que una aislada. Esta idea es la que introduce el concepto de VULNERABILIDAD.

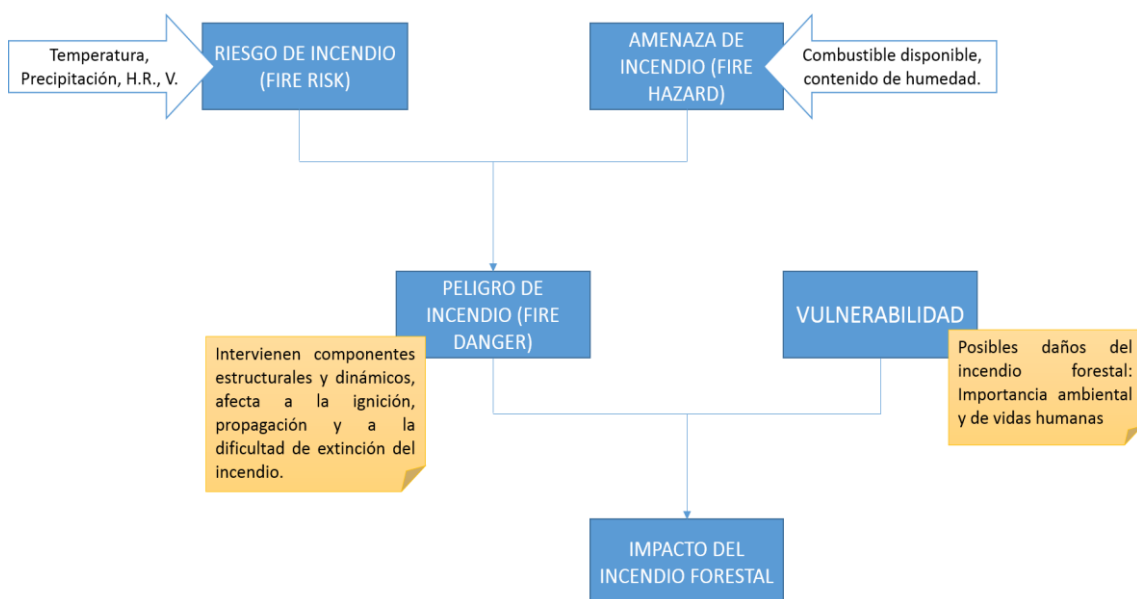


Gráfico 3. Esquema de los estados del incendio forestal

3.2 CLASIFICACIÓN DE LOS ÍNDICES DE INCENDIOS FORESTALES

La clasificación específica de los índices va acorde a los componentes e indicadores calculados, así se tiene, que por el cálculo, los índices se clasificaran en (Vicente 2007):

	CARACTERÍSTICAS	NOMBRE DE INDICES	DESARROLLADO POR	ETAPA DEL INCENDIO	ESTADO DEL INCENDIO
INDICES DE RIESGO	Índices basados en la meteorología de la zona de estudio	Icna method	ICONA, 1993	Prevención	FIRE RISK/HAZARD
		Fire Weather Index (FWI)	Van Wagner, 1974	Prevención y Extinción	FIRE RISK/HAZARD
	Índices basados en el estado de la vegetación	Normalised Difference Vegetation Index (NDVI)	Gao, 1996	Prevención	FIRE RISK/HAZARD
INDICES DE PROPAGACIÓN	Índices basados en modelos probabilísticos	Modelo Estadístico Logit	Maddala, 1988	Prevención y Extinción	FIRE DANGER
	Índices basados en modelos físicos del incendio	Modelo Físico de Rothermel	Rothermel and Forest, 1972	Extinción	FIRE DANGER
INDICES INTEGRADOS	Integran diversos índices para estudiar diferentes etapas del incendio	Modelo EUDIC del JRC de Europa	Camian and Bovio, 2000	Prevención y Extinción	FIRE DANGER

Tabla 2. Resumen de la clasificación de Índices de Incendios Forestales

3.2.1 ÍNDICES DE RIESGO.

Son los que analizan la probabilidad de un evento no deseado y sus resultados. Un evento no deseado es una realización de un peligro. La probabilidad de un incendio forestal se produce en un lugar específico y bajo circunstancias específicas, junto con su resultado esperado según la definición de sus impactos sobre los objetos que afecta (Keetch and Byram 1968, Van Wagner 1987).

Al mismo tiempo los índices de riesgo tienen una sub-clasificación que depende de la forma con que se realice el cálculo para obtener los valores de riesgo, y son:

3.2.1.1 ÍNDICES BASADOS EN LA METEOROLOGÍA DE LA ZONA DE ESTUDIO.

Basado en fundamentos físicos regidos por la difusión de la humedad en los combustibles. Estos índices fueron desarrollados mediante experimentos de laboratorio con los cuales se ejercen control sobre la mayoría de las variables que intervienen en el proceso. Muchos de los índices meteorológicos de peligro tienen un factor acumulativo,

que considera a partir de las condiciones meteorológicas pasadas las condiciones presentes. **Ejemplos:**

- **ICONA METHOD.** Desarrollado a partir del modelo del contenido de humedad en el combustible fino muerto que fue desarrollado por (Rothermel, Wilson et al. 1986). Se basa en la basura y el contenido de humedad del combustible fino muerto que son muy sensibles a las variaciones meteorológicas.

La temperatura del aire y la humedad relativa son los parámetros básicos requeridos para obtener la humedad básica. La misma que es corregida después, de acuerdo con la época del año, hora del día, la cubierta del terreno, aspecto y pendiente (ICONA 1993).

- **FIRE WHEATER INDEX (FWI).** Consta de seis componentes que reflejan los efectos de la humedad del combustible y el viento, en el comportamiento del fuego. El cálculo de los componentes se basa en observaciones diarias consecutivas de la temperatura, humedad relativa, velocidad del viento y la lluvia de 24 horas. Los seis componentes estándar proporcionan calificaciones numéricas del potencial relativo de los incendios forestales (Van Wagner 1974).

3.2.1.2 ÍNDICES BASADOS EN EL ESTADO DE LA VEGETACIÓN.

Estiman la ignición y se basan en intercambio de los combustibles forestales con el vapor de agua del medio que les rodea, hasta alcanzar entre ambos, que la presión de vapor de agua en la superficie del combustible esté en equilibrio con el medio. El tiempo en alcanzar esta humedad de equilibrio depende del grosor de los combustibles y de su estado vegetativo. **Ejemplo:**

- **NORMALISED DIFFERENCE VEGETATION INDEX (NDVI).** Está relacionado con diversas variables fisiológicas como la actividad fotosintética, y el estudio de su evolución temporal permite realizar un seguimiento del estado de humedad de la vegetación. En zonas de bosques, un decrecimiento en los valores de NDVI presentará una relación con un incremento en el estrés hídrico y por tanto con un aumento en el peligro de incendio.

El índice se fundamenta en la diferencia de reflectividad que existe entre la vegetación vigorosa y aquella que está seca, de modo que se puede predecir la disponibilidad que presente para arder, en caso de que existan causas externas. En general se estudia por comparación frente a años anteriores o promedio (Gao 1996).

3.2.2 ÍNDICES DE PROPAGACIÓN

Los índices de propagación ayudan a resolver diversos problemas significativos de la lucha contra incendios, entre los cuales está el desarrollar un plan óptimo para la extinción de incendios forestales en tiempo real, mediante la implementación de tácticas más eficaces para dicha extinción (Weber 1991, Albright and Meisner 1999).

Otro de los aspectos importantes basado en la simulación de la propagación de incendios forestales, es la estimación del trabajo que se presenta en el final de la época de incendios y guarda relación con el accionar del cuerpo de bomberos. Resulta importante determinar la zona potencial que un incendio forestal pueda abarcar si éste no se extingue.

Al igual que los índices de riesgo, los de propagación cuentan con una sub-clasificación dependiente de la forma como se calcule:

3.2.2.1 ÍNDICES BASADOS EN MODELOS PROBABILÍSTICOS.

Construidos en base al análisis de las estadísticas de casualidad o frecuencia de los siniestros ocurridos en series anuales suficientemente extensas (mínimo 10 años). A partir de las mismas, se definen indicadores estadísticos que expresan los distintos componentes del índice de riesgo, calculándose la importancia relativa de cada uno de ellos es función de los mismos datos estadísticos. **Ejemplo:**

- **MODELO ESTADÍSTICO LOGIT.** Considera la existencia de una variable lógica Y , dependiente de probabilidad diaria de ocurrencia de incendios (al menos uno). Cuando $Y = 0$, no hay ocurrencia de incendios, y cuando $Y = 1$, hay ocurrencia de incendios ese día (Maddala 1988). En este modelo, el logaritmo de la razón de las probabilidades de los dos posibles resultados es una función lineal de las variables independientes.

3.2.2.2 ÍNDICES BASADOS EN MODELOS FÍSICOS DEL INCENDIO.

Basados en el planteamiento de modelizar mediante fórmulas o algoritmos matemáticos, alguno de los procesos del incendio: ignición, propagación y extinción, empleando variables como la vegetación, el terreno, la meteorología, etc. **Ejemplo:**

- **MODELO FÍSICO DE ROTHERMEL.** Evalúa la energía que genera el fuego, la transmisión de calor desde el fuego hacia el combustible contiguo al fuego y la energía que el combustible absorbe. En el modelo son considerados los combustibles tanto vivos

como muertos y sus contenidos de humedad. También considera el efecto que tiene el viento y de la pendiente en la transferencia del calor, la carga, la compacidad del combustible, etc. Dichos factores son los que establecen la forma y la velocidad de propagación del fuego. (Rothermel and Forest 1972)

3.2.3 ÍNDICES INTEGRADOS

Este tipo de índices integran las dos clasificaciones, tanto índices de riesgo como de propagación. Ayudan al estudio de los siniestros en cualquiera de sus fases, desde la ignición, propagación y extensión de los mismos. En Europa actualmente se utiliza un índice regional integrado desarrollado por el JOINT RESEARCH CENTRE llamado EFFIS por sus siglas en inglés (Camian and Bovio 2000).

El Sistema de Información sobre Incendios Forestales Europeos (EFFIS) ha sido establecido por el Joint Research Centre (JRC) y la Dirección General de Medio Ambiente (DG MA) de la Comisión Europea (CE) para apoyar a los servicios encargados de la protección de los bosques contra los incendios en los países de la UE y países vecinos, cuya función también se centra en proporcionar los servicios a la CE y el Parlamento Europeo con la información sobre los incendios forestales en Europa.

EFFIS aborda los incendios forestales de una manera integral, proporcionando evaluaciones a nivel de la UE a partir de las fases antes del incendio hasta las posteriores al incendio, lo que apoya la prevención, preparación, lucha contra el fuego y las evaluaciones post-incendio.

El núcleo del EFFIS consiste en una infraestructura científica y técnica de investigación sobre los incendios forestales y la operación de una plataforma en la web. Además EFFIS es apoyada por una red de expertos en incendios forestales de 22 países de la UE que se reúnen regularmente con los servicios de la CE.

Aparte del sistema en línea de la web, existe una base de datos extensa de incendios de la UE que se mantiene dentro del EFFIS, así como de informes sobre los incendios forestales que se producen anualmente en Europa.

A lo largo de la temporada de incendios (junio a septiembre), los mapas de riesgo de incendios previsto son enviados diariamente a los servicios forestales y los servicios de protección civil de la UE, las estadísticas de incendios para la evaluación en curso de la temporada de incendios se intercambian trimestralmente y los boletines se emiten mensualmente. Además, el equipo EFFIS en el JRC responde a peticiones especiales de las evaluaciones específicas de existir una gran crisis de incendios forestales en la UE.



La integración de los índices se da mediante un software llamado EUDIC y que fue desarrollado en el marco de la colaboración entre el Departamento AGROSELVITTEr de la Universidad de Turín y el Space Application Institute of the Joint Research Centre. El software está destinado a calcular una serie de datos diarios meteorológicos de la base de datos MARS o datos meteorológicos pronosticados por el MeteoFrance. La salida son mapas raster de la cuenca mediterránea europea y otras partes del territorio europeo, que muestran la distribución espacial del nivel de peligro de incendio en un día determinado, segmentado en 5 clases.

Los índices de riesgo y propagación de incendios forestales utilizados en el EFFIS son (Camian and Bovio 2000):

- Portuguese Index
- Drought-Sol Numerical Risk
- Canadian Fire Weather Index (FWI)
- BEHAVE (Dead Fine Fuel Moisture Content)
- Italian Fire Danger Index
- ICONA Method

3.3 ÍNDICES DE INCENDIOS FORESTALES PARA EL CASO DE ESTUDIO

Para el presente estudio se escogieron los índices de riesgo con una resolución espacial local, un alcance temporal que analiza el riesgo a corto plazo, y aquellos que están basados en la meteorología de la zona de estudio, puesto que en este tipo de índices se utiliza series de datos de precipitación y temperatura, pudiéndose estudiar la influencia que tendrá el cambio climático en el incremento o disminución de las precipitaciones, así como el cambio que tendrá la temperatura, y si esto repercutirá en el aumento de riesgo de incendios forestales. Los índices escogidos son los más utilizados y ampliamente aplicados para diferentes partes del mundo, y que han sido implementados en bosques mediterráneos. (Carvalho, Carvalho et al. 2011, Ganatsas, Antonis et al. 2011):

- FIRE WEATHER INDEX (FWI) – CANADÁ. (Van Wagner 1974)
- KEETCH AND BYRAM DROUGHT INDEX (KBDI) – ESTADOS UNIDOS. (Keetch and Byram 1968)

3.3.1 FIRE WEATHER INDEX (FWI)

El Índice meteorológico de incendios forestales (FWI) es una estimación del riesgo de incendio forestal calculado por Météo France y el Servicio Meteorológico de Canadá. Fue introducido en Francia en 1992, pero se basa en un modelo empírico canadiense desarrollado y ampliamente utilizado desde 1976 (Van Wagner 1974).

El FWI consta de seis componentes que dan cuenta de los efectos de la humedad del combustible y el viento en el comportamiento del fuego.

Los tres primeros componentes, los códigos de humedad del combustible, son calificaciones numéricas del contenido de humedad de la hojarasca y otros combustibles finos, el contenido medio de humedad de las capas orgánicas débilmente compactadas de profundidad moderada, y el contenido medio de humedad de las capas orgánicas profundas, compactos como se muestra en la Gráfico 4.

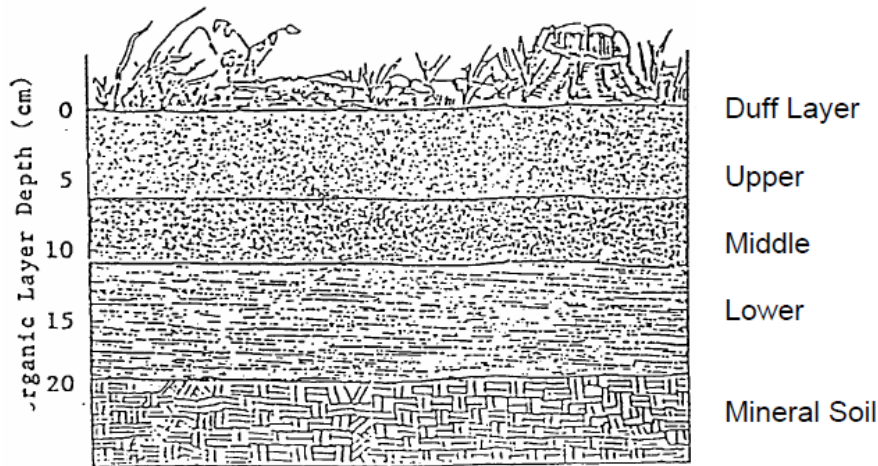


Gráfico 4. Capas del suelo que intervienen en el cálculo de los códigos de humedad del combustible

Los tres componentes restantes son índices de comportamiento de fuego, lo que representa la tasa de propagación del fuego, el combustible disponible para la combustión, y la intensidad de fuego frontal; sus valores aumentan a medida que el peligro aumenta fuego.

En la gráfico 5 se ilustra los componentes del Sistema FWI. El cálculo de los componentes se basa en observaciones diarias consecutivas de la temperatura, humedad relativa, velocidad del viento y la lluvia de 24 horas. Los seis componentes estándar proporcionan calificaciones numéricas del potencial relativo de los incendios forestales (Van Wagner 1987).

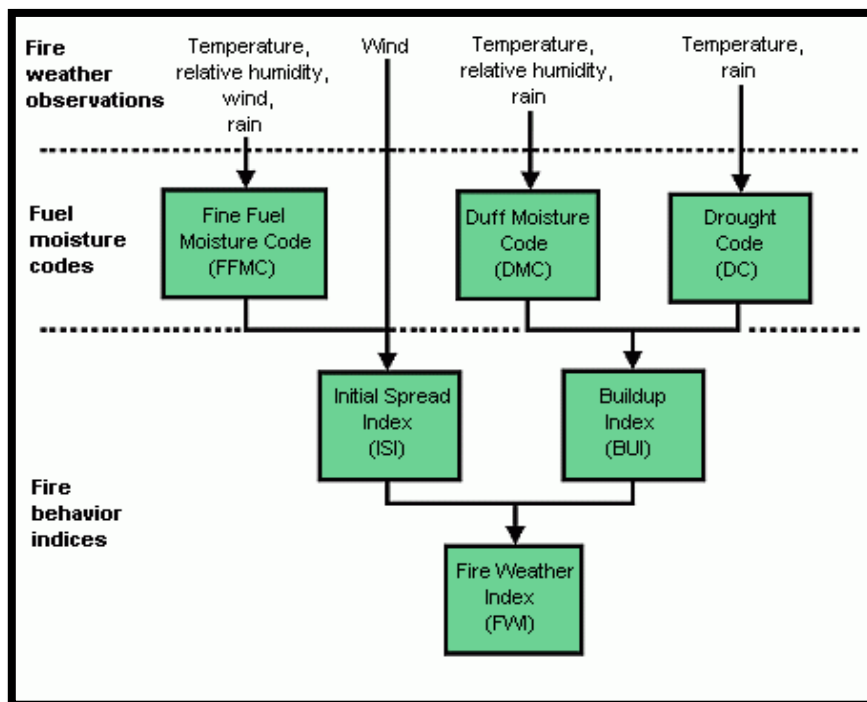


Gráfico 5. Estructura del Fire Weather Index (FWI)

- **FINE FUEL MOISTURE CODE.** (FFMC) es una calificación numérica del contenido de humedad de la basura y otros combustibles finos curados. Este código es un indicador de la relativa facilidad de ignición y la inflamabilidad del combustible fino.
- **DUFF MOISTURE CODE.** (DMC) es una calificación numérica del contenido medio de humedad de las capas orgánicas débilmente compactadas de profundidad moderada. Este código proporciona una indicación del consumo de combustible en capas moderadas “Duff” y el material leñoso de tamaño mediano.
- **DROUGHT CODE.** (DC) es una calificación numérica del contenido medio de humedad de las capas orgánicas profundas y compactas. Este código es un indicador útil de los efectos de la sequía estacional sobre los combustibles forestales y la cantidad de humeante en las capas profundas “Duff” y troncos de gran tamaño.
- **INITIAL SPREAD INDEX.** (ISI) es una clasificación numérica de la tasa esperada de la propagación del fuego. Combina los efectos del viento y la FFMC sobre la tasa de propagación sin la influencia de cantidades variables de combustible.
- **BUILDUP INDEX.** (BUI) es una clasificación numérica de la cantidad total de combustible disponible para la combustión. Combina el DMC y el DC.
- **FIRE WEATHER INDEX.** (FWI) es una clasificación numérica de la intensidad del fuego. Combina el Índice de propagación inicial y el índice de acumulación. Es adecuado como un índice general de peligro de incendios en todas las zonas boscosas de Canadá.

Originalmente Van Wagner (1974) estableció una escala de riesgo para Canadá, Tabla 3; por medio de los valores actuales para el FWI y la situación que se encontraban los bosques.

CALIFICACIÓN	RANGOS
MUY BAJO	0-5
BAJO	5-10
MODERADO	10-20
ALTO	20-30
EXTREMO	>30

Tabla 3. Clasificación original de riesgo de incendio para el FWI (Canadá)

Actualmente esa escala se ha ido modificando de acuerdo a la zona donde se implemente este índice. Así Cruz estableció para Portugal una escala para el valor del FWI que se presenta en la Tabla 4, la cual se adoptará para el presente estudio, debido a su similitud al clima español (Cruz 2000).

CALIFICACIÓN	RANGOS
BAJO	0-3
MODERADO	4-17
ALTO	18-27
MUY ALTO	28-38
EXTREMO	>39

Tabla 4. Clasificación modificada de riesgo de incendio para el FWI (Portugal)

En Canadá el FWI se ha desarrollado para mostrar los mapas de riesgo en todo su territorio, para cada día del año. El mapa que se presenta a continuación en el gráfico 6, muestra los resultados de la aplicación del FWI para todas las zonas de Canadá en época de verano, 31 de Julio del 2013 (<http://cwfis.cfs.nrcan.gc.ca/maps/fw?type=fwi>).

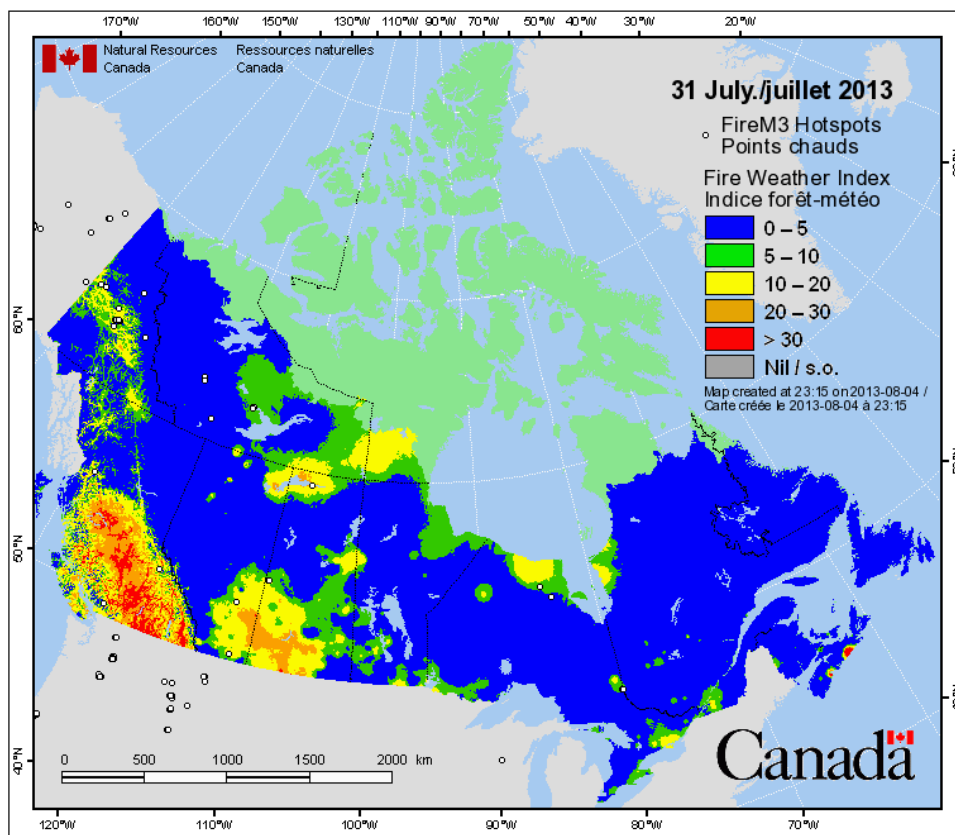


Gráfico 6. Valores del FWI del 31 de Julio del 2013 en Canadá.

3.3.2 KEETCH AND BYRAM DROUGHT INDEX (KBDI)

Índice de Sequía Keetch-Byram (KBDI) es un índice utilizado para determinar el potencial de incendios forestales. Se basa en un equilibrio diario de agua, donde un factor de sequía se equilibra con precipitación y la humedad del suelo (que se supone que tengan una capacidad máxima de almacenamiento de 8 pulgadas) y se expresa en centésimas de pulgadas de agotamiento de la humedad del suelo (Keetch and Byram 1968).

El índice de sequía varía de 0 a 800, donde un índice de sequía de 0 representa sin agotamiento de la humedad, y un índice de 800 representa las condiciones de sequedad absoluta. En la actualidad, este índice se deriva de las estimaciones basadas en tierra de temperatura y precipitación derivada de estaciones meteorológicas e interpoladas manualmente por expertos del Servicio Forestal de Texas (TFS) para los condados en todo el estado.

El KBDI utiliza como datos de entrada la precipitación y la temperatura, acompañado con el índice KBDI del día anterior.

Mediante un proceso de contabilidad sencilla, se calcula la lluvia neta que será restada al índice KBDI del día anterior, el cual combinado con la temperatura, mediante tablas que fueron desarrolladas por Keetch and Byram (1968), se obtiene un factor de sequía que se irá sumando día a día obteniendo el valor del KBDI del día actual. La estructura se muestra en el gráfico 7 que se presenta a continuación:

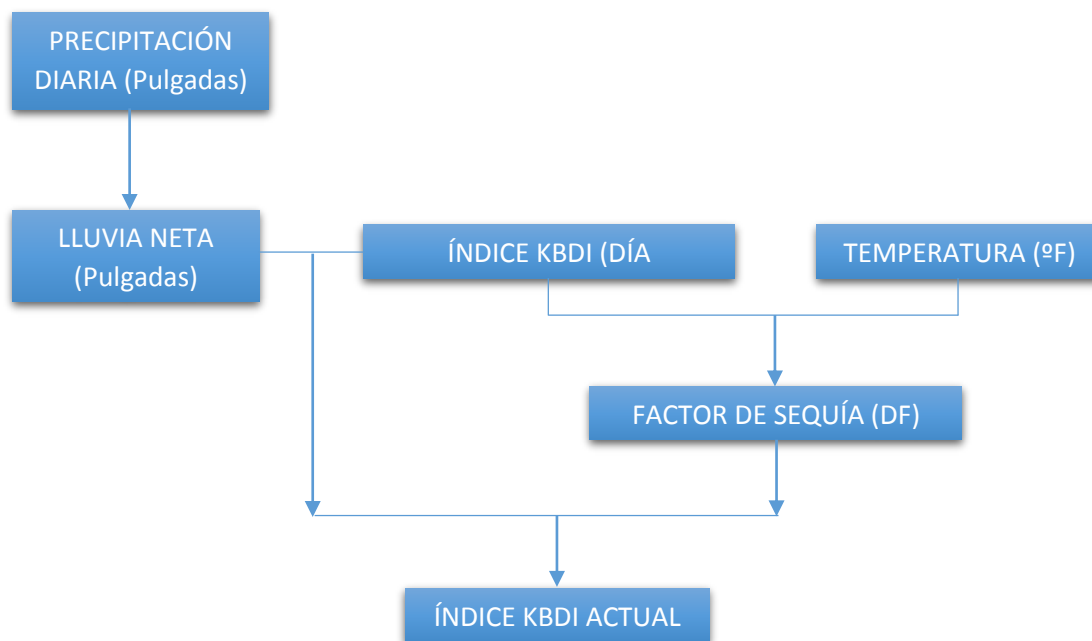


Gráfico 7. Estructura Del Keetch and Byram Drought Index (KBDI)

En la tabla 5 se muestra la escala de riesgo original que se desarrolló para las condiciones del estado de Texas.

KBDI – ESCALA DE RIESGO	
0-200:	Elevada humedad del suelo y combustibles
BAJO	Poca contribución a la intensidad de posibles incendios
	Primavera, estaciones siguientes a las lluviosas
200-400:	Poca humedad en las últimas capas del suelo
MODERADO	Posible contribución a la intensidad de incendios
	Final de primavera, épocas de rápido crecimiento de las plantas
400-600:	Suelos muy secos
ALTO	Contribución activa en la intensidad de posibles incendios
	Finales de verano
600-800:	Sequías extremas
EXTREMO	Gran aumento probabilidad de incendios incontrolables

Tabla 5. Clasificación original del riesgo de incendio del KBDI

El KBDI se ha desarrollado de una forma muy completa en Estados Unidos, llegando actualmente a integrar el índice con mapas satelitales en Google Earth, los cuales, se actualizan diariamente y muestran valores en tiempo real. Esta integración es llevada a cabo gracias al Servicio Forestal estadounidense (USFS), y su programa llamado **Windland Fire Assessment System (WFAS)**. El WFAS ofrece datos de los mapas basados en puntos en un formato compatible con Google Earth. Los archivos se actualizan diariamente e incluyen tiempo actual, el peligro de incendios y las observaciones de humedad del combustible, así como las condiciones de previsión del tiempo cuando esté disponible (<http://www.wfas.net/>). A continuación se presenta los valores presentados por el WFAS, del KBDI para una estación en el estado de Texas, HAMBLY, en los días 5 y 6 de Febrero del 2014.

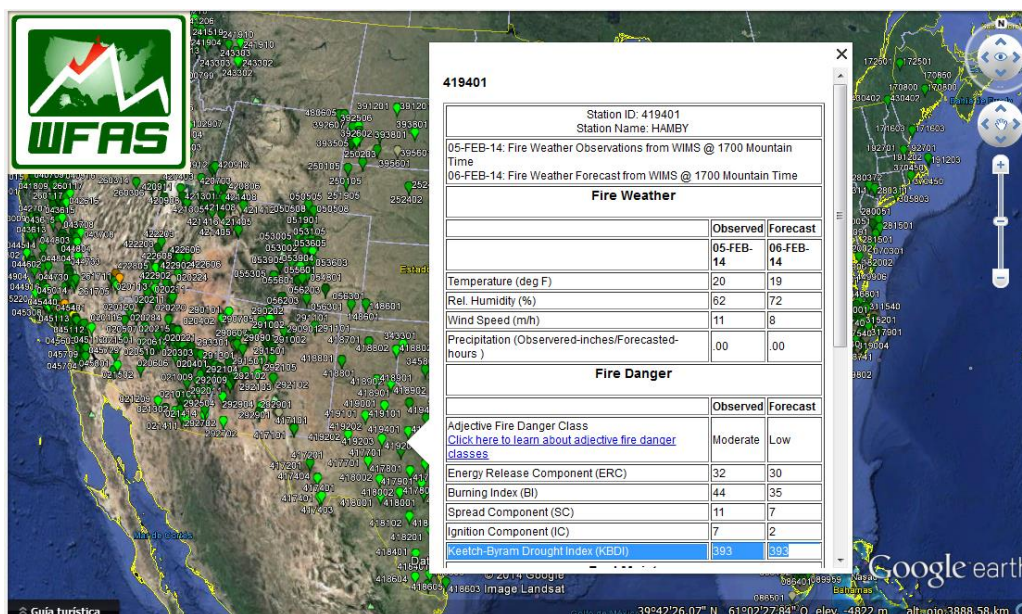


Gráfico 8. Información del KBDI para una estación el estado de Texas. FUENTE: WFAS

3.4 CAMBIO CLIMÁTICO Y LOS INCENDIOS FORESTALES

El cambio climático es actualmente un gran reto ambiental que nos estamos enfrentando, y los incendios forestales no quedan a un lado de esta problemática: altas temperaturas, olas de calor, aumento de la desertización, etc. hacen que los montes estén llenos de vegetación seca que se convierte en combustible que alimenta el fuego.

A pesar de no ser el cambio climático una causa de incendio, el mismo sí está produciendo “nuevos” incendios, empeorando las condiciones tanto de inicio como de propagación. Ya no son nuevas las noticias de incendios descontrolados que llegan a suponer una amenaza a la población, como por ejemplo en Australia, California, Grecia, Portugal o España con el desalojo de miles de personas. En España en 2012, 30.000 personas tuvieron que ser desalojadas de sus casas por el peligro de incendio forestal (MAGRAMA 2013).

El cambio climático incrementa la mordacidad de los incendios: se quema más en menos incendios. En 2012, el 65% de la superficie quemada corresponde a los Grandes Incendios Forestales (GREENPEACE 2013).

Alrededor del mundo se ha investigado las repercusiones que tendrá el cambio climático sobre los incendios forestales (Moriondo, Good et al. 2006). De los estudios realizados hasta la actualidad se encontró que han sido desarrollados, principalmente, bajo dos metodologías, una de ellas es analizando serie de datos observados para así proyectar los resultados a una probabilidad futura (Wastl, Schunk et al. 2012), por ejemplo el análisis hecho al impacto que causaría la subida de las temperaturas y los cambios en los patrones de precipitación sobre la meteorología del peligro de incendios forestales en la zona de los Alpes. Se ha evaluado dicha meteorología para el período 1951-2010 sobre la base de los diferentes índices de peligro de incendios forestales (FWI, Nesterov, Baumgartner, etc.) calculados sobre una base diaria.

En las 3 zonas de los Alpes se concluyó que el calentamiento global debido al forzamiento por gases de efecto invernadero no tiene un impacto homogéneo en el clima alpino. En VALAIS, una zona de los Alpes occidentales, con un riesgo generalmente bajo de incendio, resultó con una débil tendencia hacia más incendios forestales y más superficie quemada. La correlación entre los índices calculados y los incendios observados fue bastante baja en esta región.

En BAVARIA, la zona norte, esta correlación fue mayor, pero mientras que la tendencia de los incendios forestales aquí estaba disminuyendo en número y superficie quemada, el peligro meteorológico de incendios en contraste aumentó. Las razones para esta tendencia contrastante pueden estar relacionadas con factores antropogénicos

alterados tales como menos actividad militar, el progreso técnico, y una mayor conciencia.

La correlación entre los índices y los incendios forestales al sur de los Alpes, en TICINO, fue considerablemente menor, porque aquí la mayoría de los incendios forestales suelen presentarse en invierno, cuando el peligro meteorológico de incendios suele ser menor que en verano. En esta región hay una tendencia positiva hacia ese peligro, en las últimas décadas también se vio contrarrestado por la disminución de las igniciones antropogénicas.

Otra metodología de estudio del impacto que tiene en los incendios forestales, es por medio de modelos y escenarios de cambio climático, los cuales utilizan una serie de datos mensuales del clima futuro, estos se contrastan con la serie de datos observados y se analiza la variación que presenta (Flannigan, Stocks et al. 2000). Por ejemplo el estudio realizado de los impactos del cambio climático sobre los incendios forestales mediante modelos de circulación general (GCM), Hadley GCM y Canadian GCM, para estimar la gravedad de la temporada de incendios en el medio del siglo que viene en Norte América.

Se obtuvo como resultado un incremento de entre el 10 - 50 % sobre la mayor parte de esta región, salvo unas zonas en las que hubo poco cambio o cuando la CLASIFICACIÓN DE GRAVEDAD DE LA TEMPORADA (SSR por sus siglas en inglés) tiende a disminuir por la mitad del próximo siglo. Un aumento de la clasificación SSR se traduce en un incremento en la actividad de incendios forestales.

Para el estado de California se ha analizado también el riesgo de incendios forestales pero con una metodología diferente, (Westerling and Bryant 2008) mediante cuatro escenarios de cambio climático, los cuales fueron estadísticamente modelados como funciones del clima, la hidrología y topografía de la zona. Los modelos del clima Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL) y Parallel Climate Model (PCM); y escenarios de emisiones A2 y B1 se compararon para los periodos 2005-2034, 2035-2064 y 2070-2099 en contra de un período modelado de referencia 1961-1990 en California y los estados vecinos.

Ambos modelos divergieron sus resultados considerablemente para los diferentes tipos de regímenes de incendios, con un aumento en las temperaturas promoviendo una mayor frecuencia de grandes incendios en zonas húmedas, y áreas forestales, esto a través de los efectos de las temperaturas más cálidas en la inflamabilidad del combustible. Al mismo tiempo se aprecia una reducción en la disponibilidad de humedad debido a las menores precipitaciones y temperaturas más altas que conducen a una disminución de los riesgos de incendio en algunos lugares, en los que la

inflamabilidad del combustible puede ser menos importante que la disponibilidad de combustibles finos, estos resultados se muestran en el gráfico 9 como cambios porcentuales para cada uno de los modelos y escenarios utilizados.

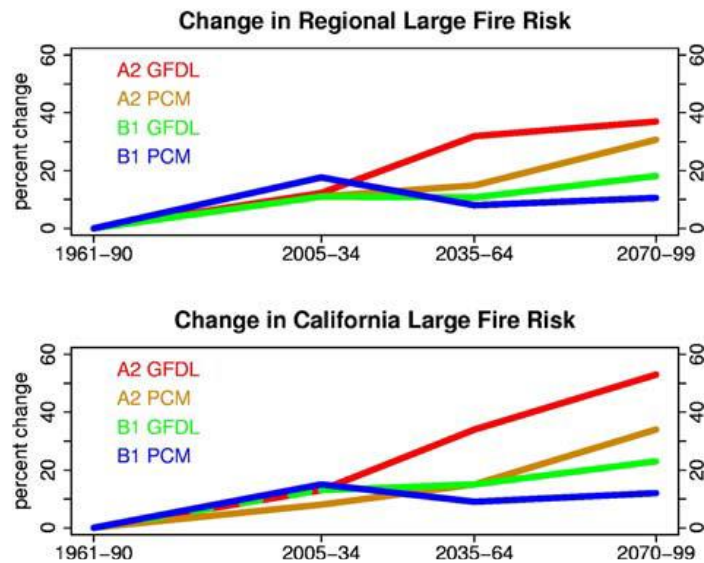


Gráfico 9. Cambio porcentual en el número anual previsto de voxels (es decir, latitud × longitud × mes) con al menos un incendio > 200 ha para la región (arriba) (California + estados vecinos) y (abajo) California sólo.

3.5 ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO. INFORME AR5 (IPCC)

De acuerdo con las conclusiones a las que el **Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)** ha llegado en su último informe sobre el cambio climático, **AR5**, es probable que para finales del siglo XXI, la temperatura global en superficie sea superior en 1,5 °C a la del período entre 1850 y 1900 para todos los escenarios considerados de trayectorias de concentración representativas (RCP), excepto para el escenario RCP2.6 (Camino, Ruggeroni et al. 2014).

Es posible que la temperatura que incremente sea superior en 2°C para los escenarios RCP6.0 y RCP8.5, y más probable que improbable que sea superior en 2°C para el escenario RCP4.5. El calentamiento se prevé que continúe después de 2100 en todos los escenarios RCP, excepto para el RCP2.6. El mismo seguirá mostrando una variabilidad entre interanual y decenal, y que no será uniforme entre las regiones (Stott 2013).

Los cambios que se provocarán en el ciclo global del agua, con respecto al calentamiento global, no serán uniformes. Resaltarán en el contraste de las precipitaciones entre las regiones húmedas y secas y entre las estaciones húmedas y secas, si bien podrá haber excepciones regionales. El nivel medio global del mar seguirá aumentando durante el presente siglo. En todos los escenarios de trayectorias de concentración representativas (RCP), es muy probable que el ritmo de elevación del nivel del mar sea mayor que el observado durante el período 1971-2010, debido al mayor calentamiento de los océanos y a la mayor pérdida de masa de los glaciares y los mantos de hielo (Stott 2013).

Los gráficos que se presentan a continuación son los resultados de la modelación de escenarios para la región Sur de Europa / Mediterráneo.

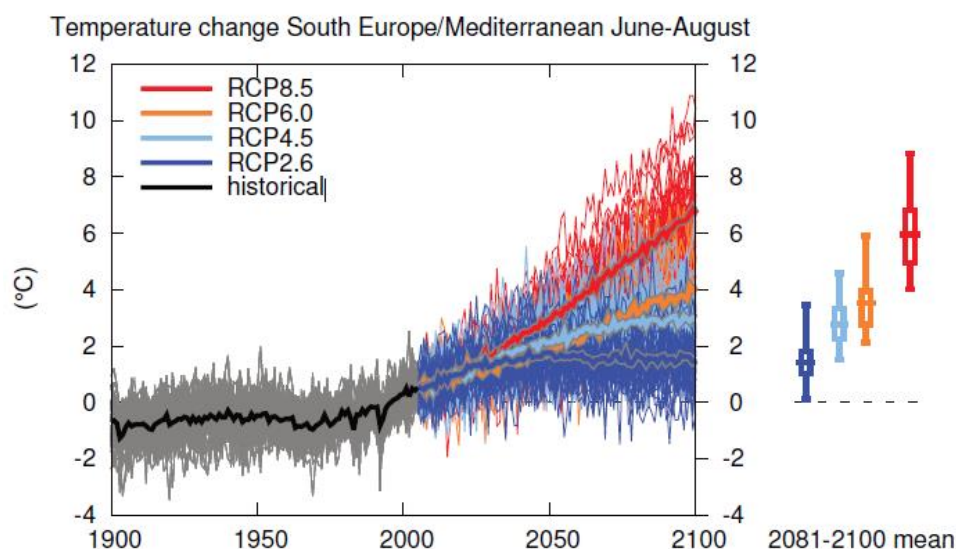


Gráfico 10. Series de tiempo de cambio de la temperatura con respecto a 1986-2005 un promedio de más puntos de la rejilla de la tierra en la región de Europa del Sur / Mediterráneo. Meses de Verano.

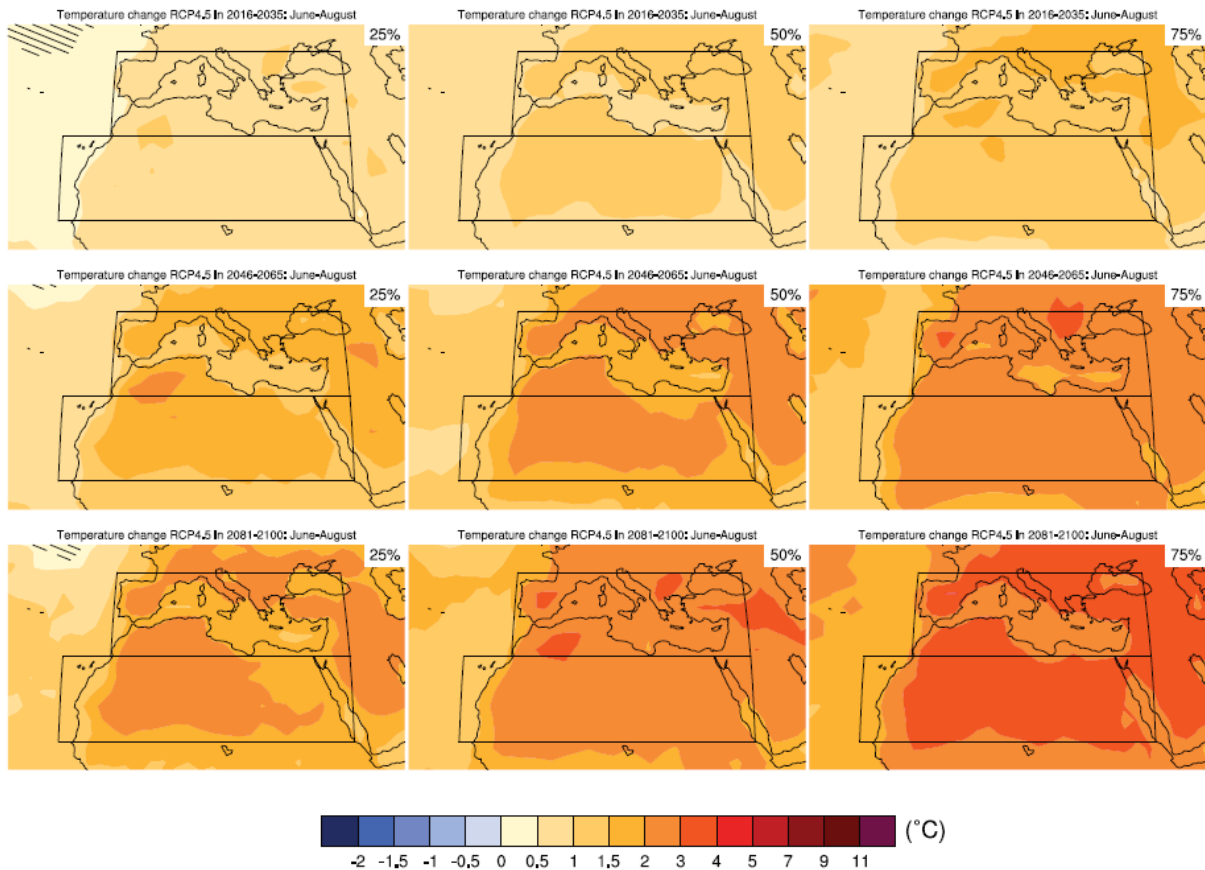


Gráfico 11. Mapas de los cambios de temperatura en 2016-2035, 2046-2065 y 2081-2100 con respecto a 1986-2005 en el escenario RCP4.5. Para cada punto, se muestran los percentiles 25, 50 y 75% de la distribución del conjunto CMIP5; esto incluye tanto la variabilidad natural y entre modelos propagación. Eclosión indica áreas donde los 20 años las diferencias de medias de los percentiles son menores que la desviación estándar de la actual variabilidad natural estimadas por el modelo de 20 años las diferencias de medias.

Como se puede observar en los gráficos anteriores, para los meses de verano la tendencia de aumento en la temperatura es notoria, y se diferencia según el escenario y el plazo en el que figure. El escenario más crítico RCP8.5, muestra unas anomalías de más de 6 grados de media para el plazo largo, sin duda un incremento bastante considerable, teniendo en cuenta que para nuestra zona de estudio, las temperaturas medias llegan a 26 grados en estos meses.

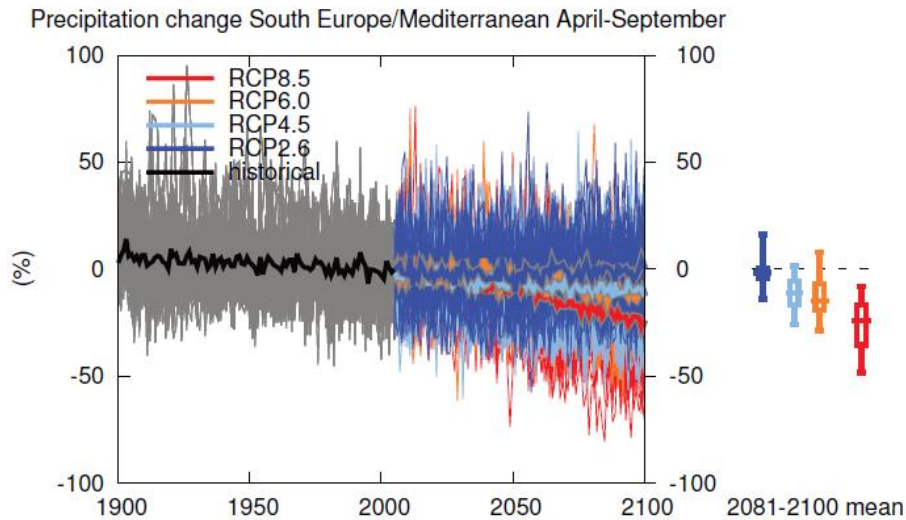


Gráfico 12. Series de tiempo de cambio relativo con respecto a 1986-2005 en la precipitación promediada sobre puntos de la rejilla de la tierra en la región de Europa del Sur / Mediterráneo. Primavera/Verano.

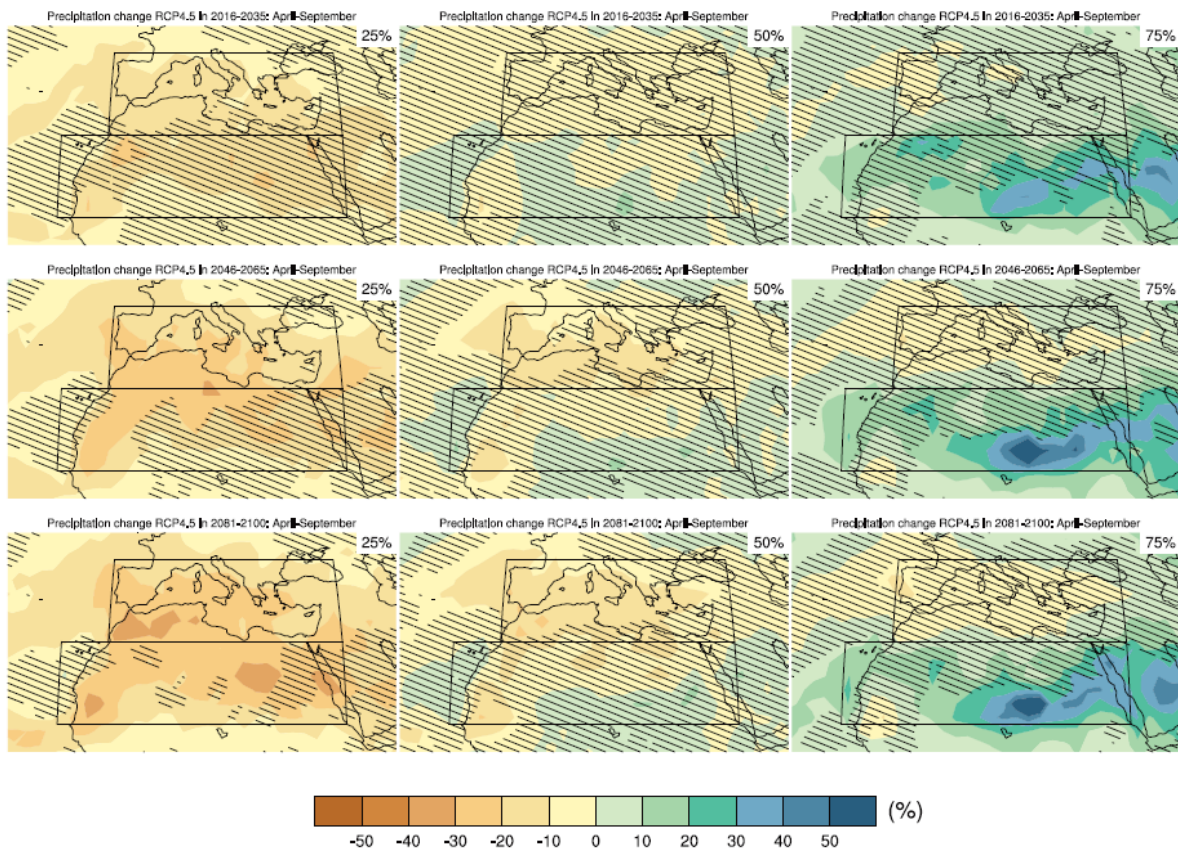


Gráfico 13. Mapas de los cambios de precipitación en 2016-2035, 2046-2065 y 2081-2100 con respecto a 1986-2005 en el escenario RCP4.5. Para cada punto, se muestran los 25, 50 y 75a percentiles de la distribución del conjunto CMIP5; esto incluye tanto la variabilidad natural y entre modelos propagación. Eclósion indica áreas donde los 20 años las diferencias de medias de los percentiles son menores que la desviación estándar de la actual variabilidad natural estimadas por el modelo de 20 años las diferencias de medias.



Los cambios en las precipitaciones son altamente variables, según sea la zona, el los gráficos presentados con anterioridad, se muestra una tendencia de subida y bajada de los milímetros de lluvia, según sea el periodo. Cabe recalcar que las precipitaciones dentro de España, en las zonas ubicadas al norte, presentaran un incremento bajo los escenarios utilizados, mientras que para zonas como en las que se ambienta nuestro estudios, Provincia de Cuenca, la tendencia es de disminuir dichas precipitaciones a medida que se alargue el plazo y según sea el escenario aplicado.

Así, tenemos que para el escenario más crítico, las precipitaciones disminuirán hasta en un 50% en el periodo más largo. Lo que conllevaría a situaciones muy graves de sequía y el aumento eventual del riesgo de incendios para las épocas más calurosas del año.

3.6 LOS INCENDIOS FORESTALES EN ESPAÑA

Los incendios forestales en España son una fiel muestra del síntoma de la enfermedad crónica que arrastra desde hace ya varias décadas el medio rural en general y el sector forestal en particular. Además de poner en riesgo bienes materiales y la vida de muchas personas.

En las últimas décadas las estadísticas ponen de manifiesto un aumento de la eficacia de los medios de extinción, lo que han conllevado a reducir la media anual de superficies afectadas por incendios. Sin embargo, el origen del problema continúa sin ser resuelto: el elevado número de siniestros, fundamentalmente debido al arraigado y generalizado uso del fuego en el medio rural, y el aumento de su intensidad e impacto como consecuencia de la elevada vulnerabilidad del monte (MAGRAMA 2014).

Ante este escenario se ha visto la necesidad de abordar el riesgo de los incendios desde dos enfoques, igualmente necesarios y urgentes. El primero va orientado en tratar de disminuir el número de siniestros que se producen al año. Si bien los últimos años reflejan una tendencia decreciente, de media al año se producen alrededor de 18.500 siniestros, una cifra sin duda alarmante. En Tabla 6 se presenta las estadísticas de incendios forestales, en España, desde el año 1994 hasta finales del 2013.

AÑO	NÚM. DE SINIESTRO	SUPERFICIE AFECTADA EN HECTAREAS		
		ARBOLADA	DESARBOLADA	TOTALES
1961	1,680	34,056	12,195	46,251
1962	2,022	23,911	31,571	55,482
1963	1,302	13,279	9,400	22,679
1964	1,645	17,671	13,727	31,398
1965	1,686	21,777	16,241	38,018
1966	1,443	24,644	24,710	49,354
1967	2,299	33,930	42,645	76,575
1968	2,115	20,449	36,048	56,497
1969	1,558	19,238	34,501	53,739
1970	3,450	35,723	54,824	90,547
1971	1,718	13,234	21,810	35,044
1972	2,194	18,412	39,341	57,753
1973	3,932	41,233	55,756	96,989
1974	4,088	59,822	82,293	142,115
1975	4,340	110,679	77,916	188,595
1976	4,577	55,308	68,269	123,577
1977	2,221	28,977	41,772	70,749
1978	8,471	161,698	277,828	439,526
1979	7,222	120,153	153,414	273,567
1980	7,190	92,293	170,724	263,017
1981	10,878	141,631	156,657	298,288
1982	6,545	65,326	87,577	152,903
1983	4,791	50,930	57,170	108,100
1984	7,203	54,491	110,628	165,119
1985	12,238	176,266	308,210	484,476
1986	7,570	113,923	150,964	264,887
1987	8,679	48,993	97,669	146,662

1988	9,247	39,521	98,213	137,734
1989	20,811	182,448	244,245	426,693
1990	12,913	72,993	130,039	203,032
1991	13,531	116,896	143,422	260,318
1992	15,955	40,438	64,839	105,277
1993	14,254	33,161	56,106	89,267
1994	19,263	250,433	187,202	437,635
1995	25,827	42,389	101,095	143,484
1996	16,771	10,532	49,283	59,815
1997	22,320	21,326	77,177	98,503
1998	22,446	42,959	90,684	133,643
1999	18,237	24,034	58,183	82,217
2000	24,118	46,138	142,448	188,586
2001	19,547	19,363	73,934	93,297
2002	19,929	25,197	82,267	107,464
2003	18,616	53,673	94,499	148,172
2004	21,369	51,732	82,461	134,193
2005	25,492	69,350	119,322	188,672
2006	16,334	71,083	84,280	155,363
2007	10,932	29,403	56,710	86,113
2008	11,656	8,443	41,878	50,321
2009	15,642	40,393	79,498	119,891
2010	11,722	10,185	44,585	54,770
2011	16,414	18,847	83,313	102,160
2012	15,902	82,201	116,735	198,936
2013	10,626	17,274	32,173	49,447

Tabla 6. Estadísticas de incendios forestales en España (1994-2013). FUENTE: MAGRAMA

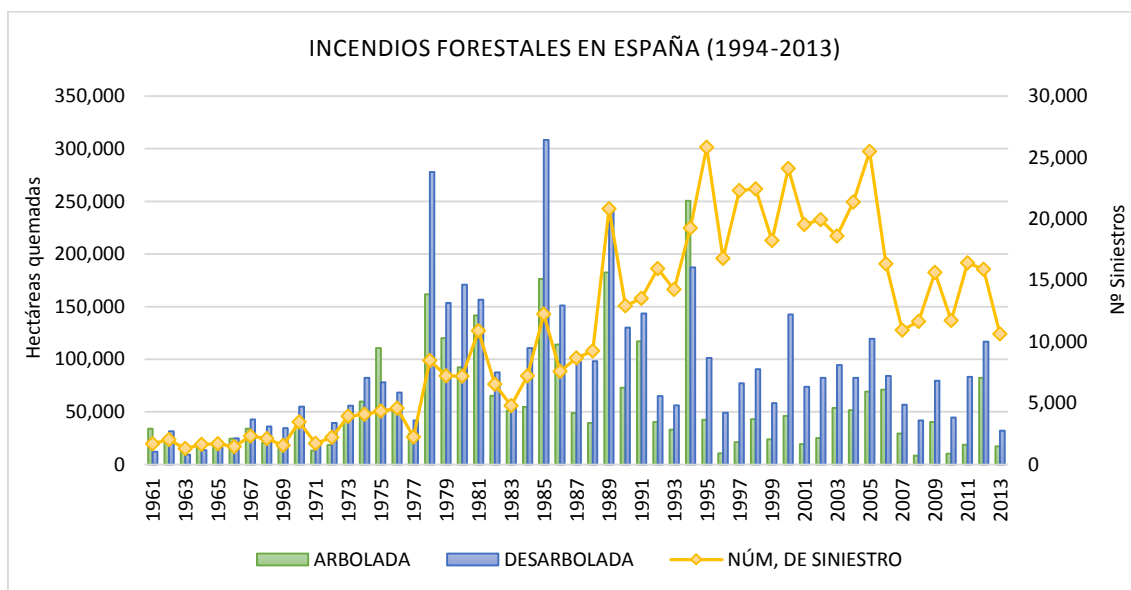


Gráfico 14. Estadísticas de incendios forestales en España (1994-2013) FUENTE: MAGRAMA

El segundo punto de acción va enfocado a tratar de disminuir el impacto de los Grandes Incendios Forestales (GIF). Aunque apenas suponen un 0,2% del total, en ellos arde de media en España el 41% de la superficie que se incendia anualmente. Mientras que sí se aprecia una tendencia de aminoramiento en el número total de siniestros y en la superficie afectada por el fuego, en lo relativo a la evolución de los GIF se confirma un escenario donde este tipo de siniestros cobran mayor importancia y virulencia (MAGRAMA 2013).

4. METODOLOGÍA

Para el análisis del riesgo de incendios forestales en la zona en estudio, se utilizaron datos proporcionados por el SAIH Júcar, de precipitación y temperatura en series diarias, así como series históricas mensuales. Los datos de humedad relativa y velocidad del viento, se obtuvieron por medio del AEMET solo en series mensuales.

Dichos datos serán la entrada para el cálculo de los índices de riesgo de incendios, el KBDI, utiliza los datos de precipitación y temperatura, mientras que el FWI, a más de esos, requiere de la humedad relativa y la velocidad del viento.

A continuación se presentan dos esquemas que detallan la metodología utilizada para la evaluación del impacto del cambio climático en los incendios forestales, el primero de estos, son las dos etapas previa a realizar el análisis, y los dos finales ya con la series histórica aplicada, presentan las 2 etapas finales para alcanzar los objetivos planteados.

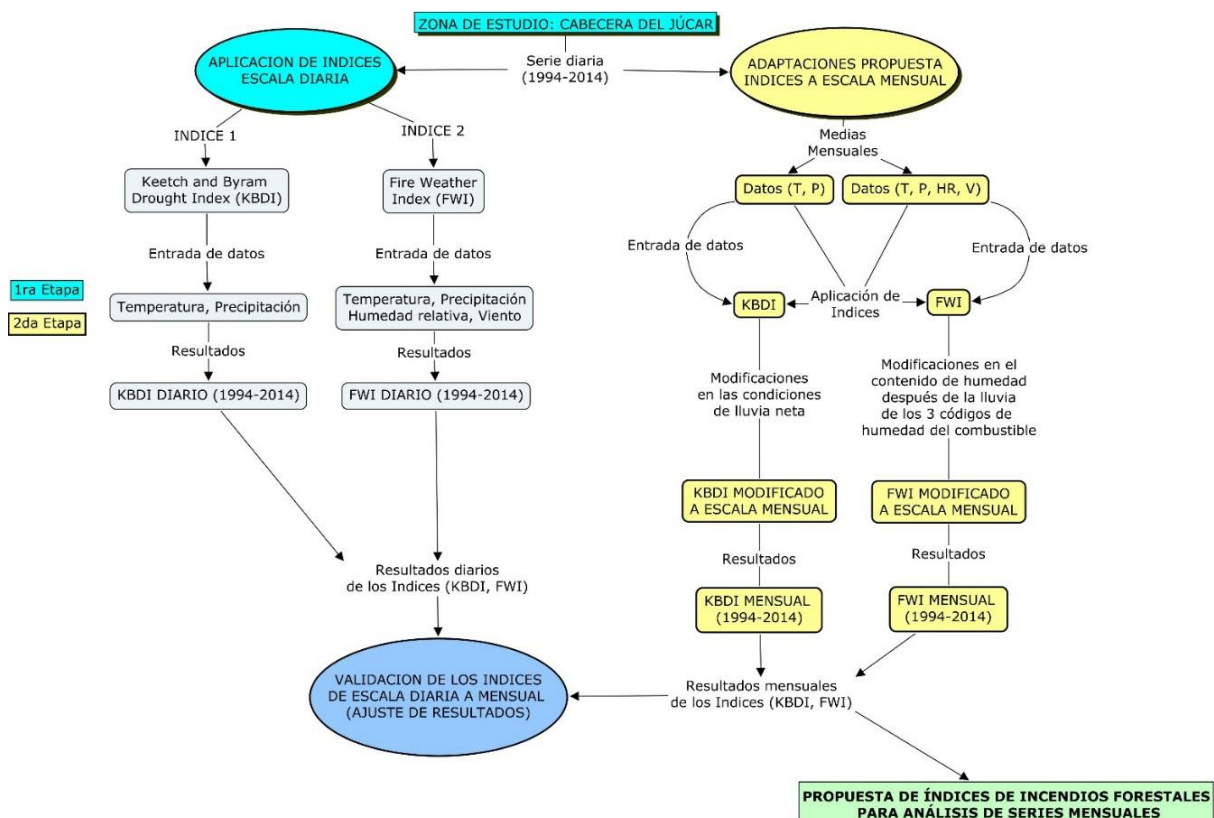


Gráfico 15. Esquema de la metodología desarrollada para el presente estudio. Etapas 1 y 2.

Implementación de Índices para la Evaluación del Riesgo de Incendios Forestales en la cabecera del Júcar y Análisis de las Repercusiones del Cambio Climático en los Incendios.

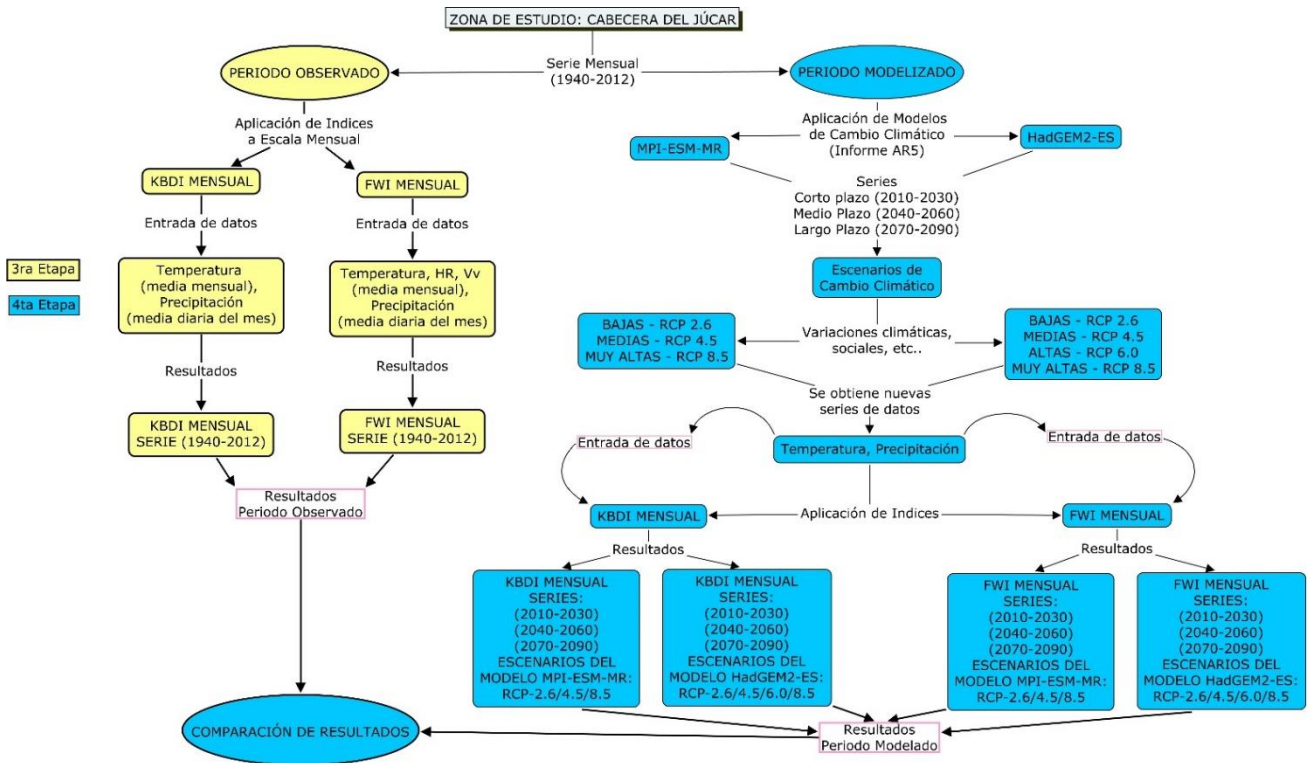


Gráfico 16. Esquema de la metodología desarrollada para el presente estudio. Etapas 3 y 4.

4.1 ANÁLISIS DIARIO

Para la primera etapa se analizaron los índices, KBDI y FWI, en una escala diaria con veinte años de datos, desde 1994 hasta el 2014, en la zona de estudio. Mediante la formulación respectiva, (Keetch and Byram 1968, Van Wagner 1974), se obtuvieron los valores de los índices para todos los días de la serie.

Cabe recalcar que para el dato del KBDI y FWI del día anterior, necesarios para el cálculo de los índices, se inició en cero, puesto que los datos diarios comienzan desde el mes de Enero y en invierno se puede considerar en riesgo bajo, (Moriondo, Good et al. 2006, Ganatsas, Antonis et al. 2011). Así como los datos de humedad relativa y velocidad, los cuales solo había en medias mensuales, fueron distribuidas estas medias para todos los días del mes respectivo.

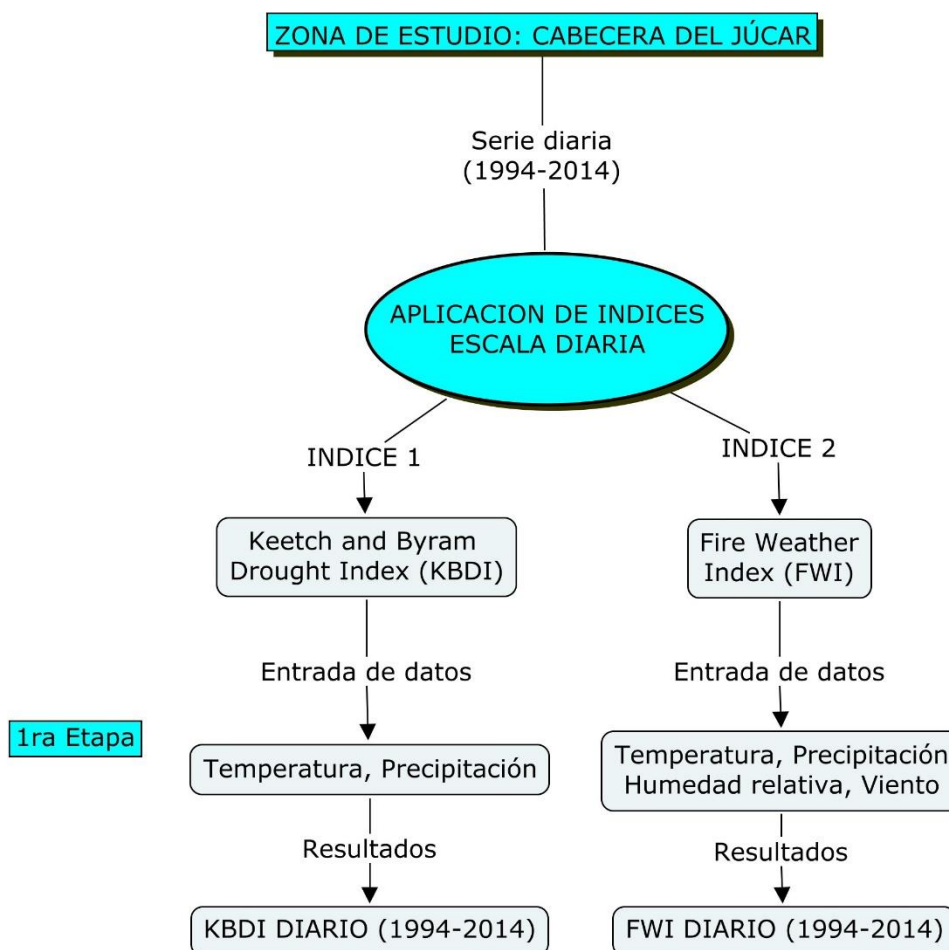


Gráfico 17. Esquema de la etapa de aplicación de índices a escala diaria.

4.2 ADAPTACIÓN MENSUAL

En una segunda etapa, se realizó una adaptación mensual de los índices, puesto que se necesita que la formulación ya existente ajuste los valores diarios obtenidos, a valores mensuales, esto debido a que para el análisis futuro, se requiere analizar series históricas mensuales y la formulación no se adapta a los datos mensuales.

Para esto fue necesario utilizar los datos diarios de precipitación y temperatura, y cambiarlos a periodos mensuales, mediante el cálculo de la media para cada mes de la serie en estudio.

Obtenidos los datos mensuales, se realiza la aplicación de los índices en la formulación original, con la cual se obtienen unos primeros resultados, que difieren de los calculados con la serie diaria por lo que se ajustan diferentes componentes para cada índice.

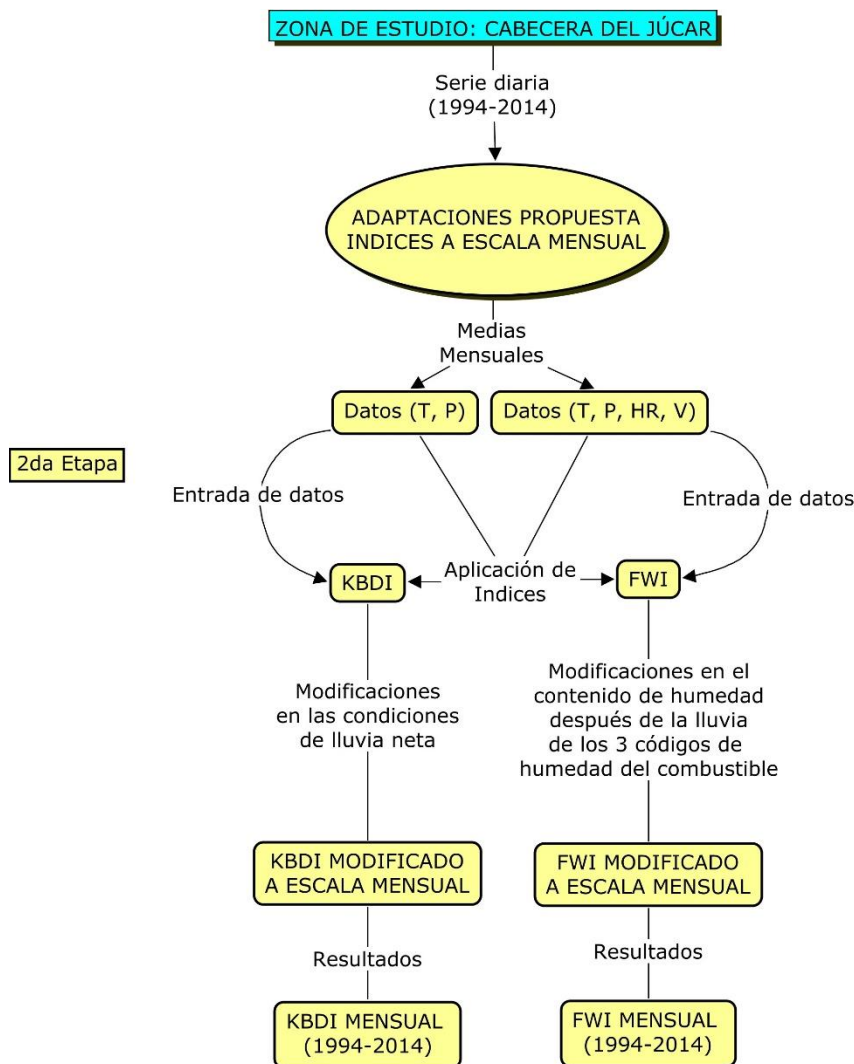


Gráfico 18. Esquema de la etapa de adaptación de los índices a escala mensual.

4.2.1 KBDI MENSUAL

En el KBDI la modificación realizada fue en las condiciones de la lluvia neta, a la formulación original, (Keetch and Byram 1968), se le realizaron los siguientes cambios:

ENERO – FEBRERO – MARZO – JUNIO – JULIO – DICIEMBRE

- Si $P_{\bar{x}mes} > 0.02 \text{ inch} \rightarrow P'_{neta} = (P_{\bar{x}mes} - 0.02 \text{ inch})$
- Si $P_{\bar{x}mes} < 0.02 \text{ inch} \rightarrow P'_{neta} = 0$

ABRIL – MAYO

- Si $P_{\bar{x}mes} > 0.6 \text{ inch} \rightarrow P'_{neta} = (P_{\bar{x}mes} - 0.6 \text{ inch})$
- Si $P_{\bar{x}mes} < 0.6 \text{ inch} \rightarrow P'_{neta} = 0$

AGOSTO – SEPTIEMBRE

- Si $P_{\bar{x}mes} > 0.03 \text{ inch} \rightarrow P'_{neta} = (P_{\bar{x}mes} - 0.03 \text{ inch})$
- Si $P_{\bar{x}mes} < 0.03 \text{ inch} \rightarrow P'_{neta} = 0$

OCTUBRE

- Si $P_{\bar{x}mes} > 0.01 \text{ inch} \rightarrow P'_{neta} = (P_{\bar{x}mes} - 0.01 \text{ inch})$
- Si $P_{\bar{x}mes} < 0.01 \text{ inch} \rightarrow P'_{neta} = 0$

NOVIEMBRE

- Si $P_{\bar{x}mes} > 0.06 \text{ inch} \rightarrow P'_{neta} = (P_{\bar{x}mes} - 0.06 \text{ inch})$
- Si $P_{\bar{x}mes} < 0.06 \text{ inch} \rightarrow P'_{neta} = 0$

Siendo:

$P_{\bar{x}mes}$ = precipitación acumulada en el mes dividida por el número de días del mes que transcurre.

P'_{neta} = lluvia neta modificada.

Las modificaciones se realizaron de acuerdo al comportamiento de la lluvia a través de los meses del año a lo largo de la serie analizada.

4.2.2 FWI MENSUAL

Para el FWI se realizaron modificaciones a la formulación original (Van Wagner 1974) del contenido de humedad después de la lluvia en los 3 códigos de humedad del combustible.

El primer componente es el contenido de humedad en el combustible fino después de la lluvia:

ENERO – FEBRERO – MARZO – SEPTIEMBRE – OCTUBRE – NOVIEMBRE – DICIEMBRE

- Si $r_f > 2\text{mm}$ y $m_0 \leq 150 \rightarrow m'_r = m_0 + 42.5 r_f (e^{-100/(251-m_0)})(1 - e^{-6.93/r_f})$
- Si $r_f < 2\text{mm}$ y $m_0 \leq 150 \rightarrow m'_r = [m_0 + 42.5 r_f (e^{-100/(251-m_0)})(1 - e^{-6.93/r_f})] * 0.9$
- Si $r_f > 2\text{mm}$ y $m_0 > 150 \rightarrow m'_r = m_0 + 42.5 r_f (e^{-100/(251-m_0)})(1 - e^{-6.93/r_f}) + 0.0015(m_0 - 150)^2 r_f^{0.5}$
- Si $r_f < 2\text{mm}$ y $m_0 > 150 \rightarrow m'_r = [m_0 + 42.5 r_f (e^{-100/(251-m_0)})(1 - e^{-6.93/r_f}) + 0.0015(m_0 - 150)^2 r_f^{0.5}] * 0.9$

ABRIL – MAYO

- Si $r_f > 2\text{mm}$ y $m_0 \leq 150 \rightarrow m'_r = m_0 + 42.5 r_f (e^{-100/(251-m_0)})(1 - e^{-6.93/r_f})$
- Si $r_f < 2\text{mm}$ y $m_0 \leq 150 \rightarrow m'_r = [m_0 + 42.5 r_f (e^{-100/(251-m_0)})(1 - e^{-6.93/r_f})] * 0.5$
- Si $r_f > 2\text{mm}$ y $m_0 > 150 \rightarrow m'_r = m_0 + 42.5 r_f (e^{-100/(251-m_0)})(1 - e^{-6.93/r_f}) + 0.0015(m_0 - 150)^2 r_f^{0.5}$
- Si $r_f < 2\text{mm}$ y $m_0 > 150 \rightarrow m'_r = [m_0 + 42.5 r_f (e^{-100/(251-m_0)})(1 - e^{-6.93/r_f}) + 0.0015(m_0 - 150)^2 r_f^{0.5}] * 0.5$

JUNIO – JULIO – AGOSTO

- Si $r_f > 2\text{mm}$ y $m_0 \leq 150 \rightarrow m'_r = m_0 + 42.5 r_f (e^{-100/(251-m_0)})(1 - e^{-6.93/r_f})$
- Si $r_f > 2\text{mm}$ y $m_0 \leq 150 \rightarrow m'_r = [m_0 + 42.5 r_f (e^{-100/(251-m_0)})(1 - e^{-6.93/r_f})] * 0.6$
- Si $r_f > 2\text{mm}$ y $m_0 > 150 \rightarrow m'_r = m_0 + 42.5 r_f (e^{-100/(251-m_0)})(1 - e^{-6.93/r_f}) + 0.0015(m_0 - 150)^2 r_f^{0.5}$

- Si $r_f < 2\text{mm}$ y $m_0 > 150 \rightarrow m'_r = [m_0 + 42.5 r_f (e^{-100/(251-m_0)}) (1 - e^{-6.93/r_f}) + 0.0015(m_0 - 150)^2 r_f^{0.5}] * 0.6$

Siendo:

r_f = lluvia neta

m_0 = contenido de humedad en el combustible fino del día anterior

m'_r = contenido de humedad en el combustible fino después de la lluvia modificado

Al igual que en el KBDI, en este código se tuvo en cuenta las variaciones que ha presentado la precipitación en los meses del año a lo largo de toda la serie diaria. Es por esto que se ha considerado las modificaciones hechas de acuerdo a los meses o época del año.

Al segundo componente, el contenido de humedad en la capa "duff" después de la lluvia se le realizó la siguiente modificación:

- Si $r_e > 2\text{mm} \rightarrow M'_r = M_0 * 1000 r_e / (48.77 + br_e)$
- Si $r_e < 2\text{mm} \rightarrow M'_r = [M_0 * 1000 r_e / (48.77 + br_e)] * 0.9$

Siendo:

r_e = lluvia neta

M_0 = contenido de humedad en la capa "duff" del día anterior

M'_r = contenido de humedad en la capa "duff" después de la lluvia modificado

Finalmente al tercer componente, humedad equivalente después de la lluvia se le ha realizado la modificación presentada a continuación:

- Si $r_d > 2\text{mm} \rightarrow Q'_r = Q_0 * 3.937 r_d$
- Si $r_d < 2\text{mm} \rightarrow Q'_r = (Q_0 * 3.937 r_d) * 0.9$

Siendo:

r_d = lluvia neta

Q_0 = humedad equivalente del día anterior

Q'_r = humedad equivalente después de la lluvia modificada



Una vez ajustadas las modificaciones se compararon los resultados de los índices a escala mensual con los resultados obtenidos por los índices a escala diaria, para ajustar los mismos y validar dichas modificaciones, con 20 años de datos y una vez comprobado que los resultados ajustan, se dan por válidos los índices para su aplicación en series mensuales.

4.3 CÁLCULO MENSUAL SERIE HISTÓRICA

Con los índices ya validados para su utilización en series mensuales, se realizó entonces un análisis a la serie histórica de los datos observados desde 1940 hasta el 2012, en la cual se tiene la precipitación y temperatura de todos los meses de la serie en estudio. Para los datos de humedad relativa y velocidad del viento, como solo se tenían datos mensuales de 20 años, se utilizó las medias mensuales de los meses de esos años y se los distribuyó de forma constante para la serie histórica.

Una vez hecha la entrada de los datos se han obtenido los valores del KBDI y el FWI para la serie histórica 1940-2012.

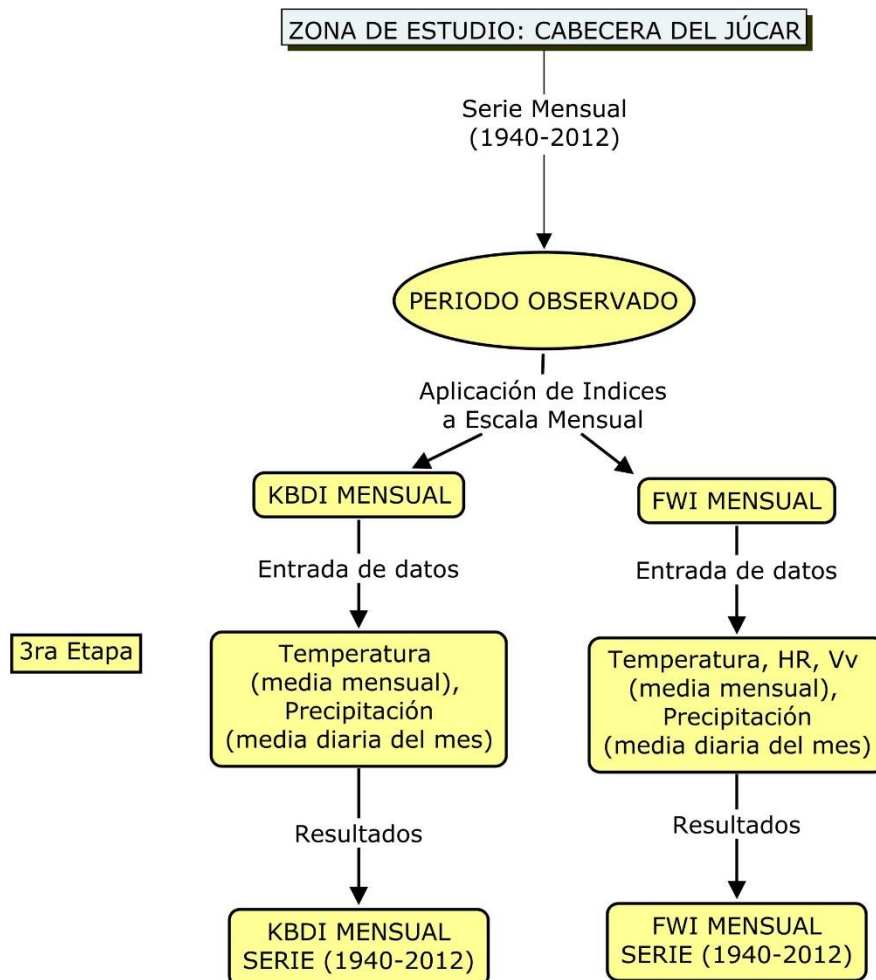


Gráfico 19. Esquema de la etapa de cálculo de la serie histórica mensual 1940-2012 en la cabecera del Júcar.

4.4 SIMULACIÓN DE ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO

Para la simulación de los escenarios de cambio climático, se analizaron periodos a corto plazo (2010-2030), mediano plazo (2040-2060), y largo plazo (2070-2090), mediante dos modelos de cambio climático, proporcionados por el IPCC en su último informe (AR5). Estos modelos son el **Earth System Model del Max-Planck-Institut für Meteorologie (running on medium resolution grid) (MPI-ESM-MR)** y el **Hadley Global Environment Model 2 - Earth System (HadGEM2-ES)**.

Para el MPI-ESM-MR, se ha modelado la serie histórica para los 3 periodos junto con 3 escenarios de cambio climático que son el RCP 2.6, RCP 4.5 y el RCP 8.5. Lo que se traduce como variaciones climáticas bajas, altas y extremas respectivamente. Una vez que se ha hecho la aplicación del modelo, se obtienen unas nuevas series de datos, que serán la entrada para el cálculo de cada uno de los índices, con lo que se obtendrán un conjunto de 9 resultados para cada índice que varían según el periodo y el escenario aplicado.

Para el modelo HadGEM2-ES, es igual con respecto a los 3 periodos, pero este modelo utiliza 4 escenarios de cambio climático que son los anteriormente mencionados junto con el RCP 6.0. Lo que se traduce como variaciones climáticas muy altas.

Se realiza la aplicación del modelo, así mismo obteniendo unas nuevas series de datos, que servirán de entrada para el cálculo de cada uno de los índices, con lo que se obtuvo un conjunto de 12 resultados para cada índice que varían según el periodo y el escenario aplicado.

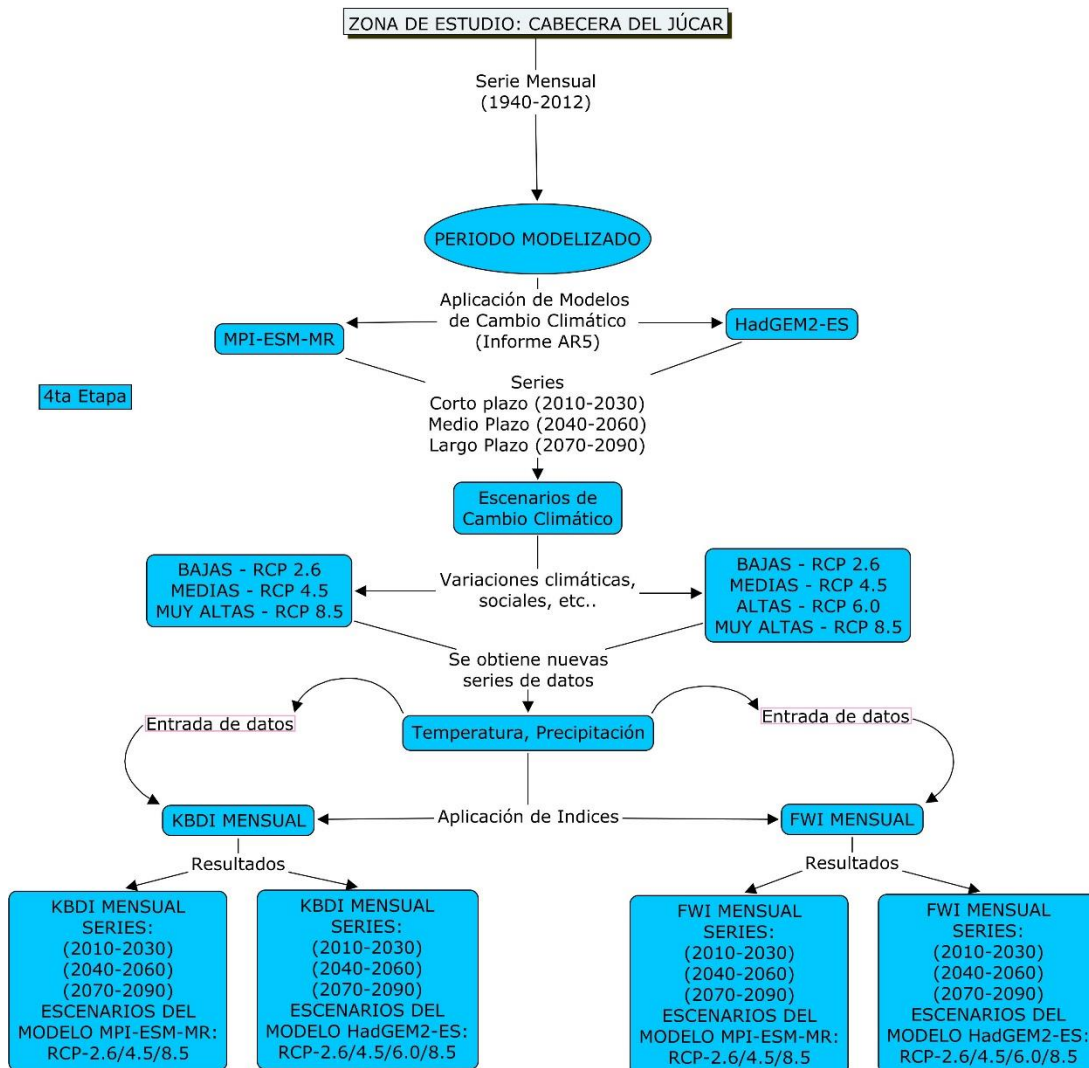


Gráfico 20. Esquema de la etapa de simulación de escenarios de cambio climático, integrada con la etapa de cálculo de la serie histórica mensual 1940-2012 en la cabecera del Júcar.

Finalmente se hace la comparación de los resultados obtenidos de los periodos modelados para cada escenario y plazo aplicado. Así mismo se contrastan resultados entre el periodo calculado de la serie histórica y los periodos modelados en cada escenario.

5. APLICACIÓN Y RESULTADOS

5.1 APLICACIÓN DE ÍNDICES

Mediante el análisis hecho para la serie diaria de datos de la zona de estudio, desde el año 1994 hasta el 2014, y la aplicación índices de riesgo de incendio, anteriormente descrito y especificado en la metodología, se logró obtener los valores diarios del riesgo de incendios para cada uno de ellos. La serie analizada se realiza desde el mes de enero de 1994 por años calendarios.

5.1.1 FWI DIARIO (1994-2014)

Con el conjunto de formulaciones proporcionadas para el cálculo del FWI, (Van Wagner 1974), y posteriormente corregidas y verificadas, (Van Wagner 1987), se aplicaron para obtener los resultados diarios de la serie en estudio del FWI mostrados en el gráfico 21. Las líneas azul, verde, amarillo y rojo, especifican los límites de la clasificación de la alerta de riesgo de este índice.

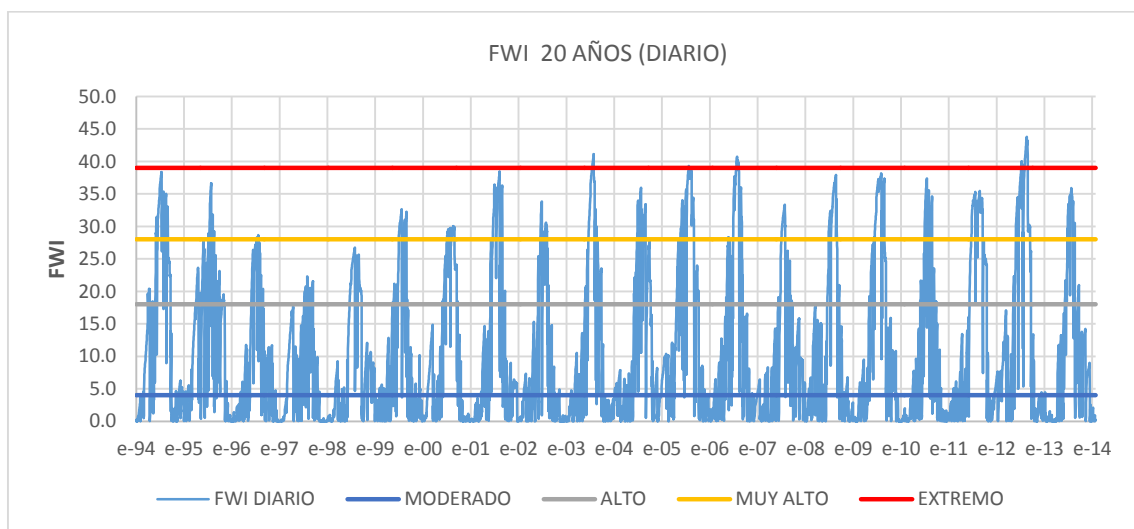


Gráfico 21. Valores diarios del FWI en la cabecera del Júcar (1994-2014)

La tendencia elevada del índice para los meses de verano, se debe a las elevadas temperaturas y ausencia de eventos de lluvias considerables, lo que sumado a que las condiciones de humedad presentan una disminución en los meses de verano, da como resultado dicho aumento en los niveles de riesgo de incendios, tal como se muestra en el gráfico anterior.

A continuación en la gráfico 22 se presenta los valores medios en cada uno de los meses de la serie analizada, estos valores resumen el riesgo de incendio a un valor mensual.

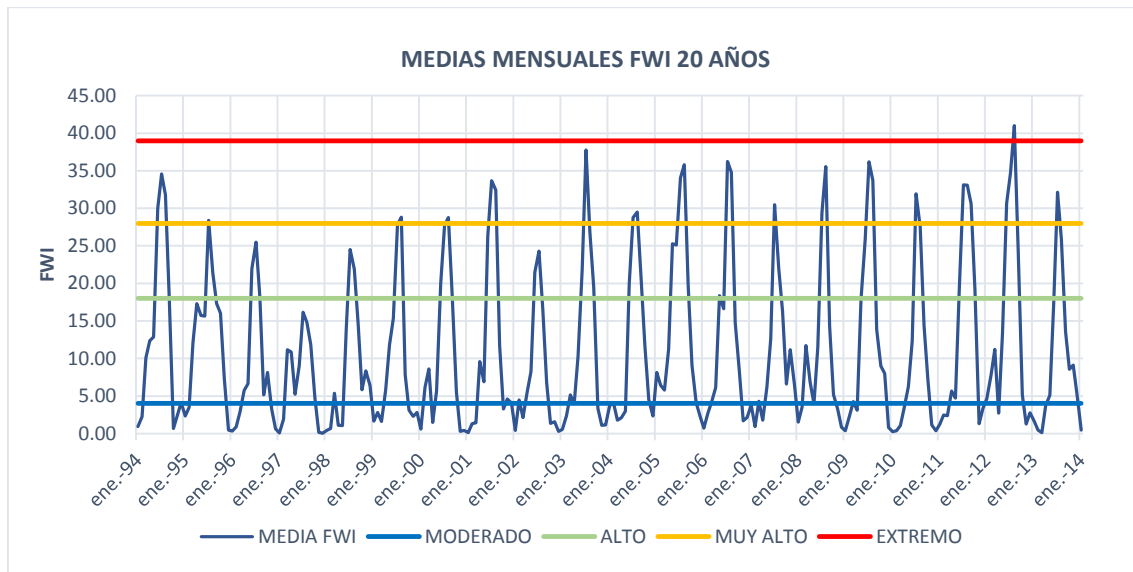


Gráfico 22. Valores medios del FWI en la cabecera del Júcar (1994-2014)

Se observa que en valores de medias mensuales en seis meses se alcanza la clasificación EXTREMA, el 47% de todos los meses analizados, su calificación de riesgo es MODERADA. A diferencia de lo que presenta el gráfico 21 en donde fueron 67 días que alcanzaron la alerta EXTREMA, todos en verano, y la mayoría, el 42% del total de días evaluados, se encuentran en alerta BAJA.

5.1.2 KBDI DIARIO (1994-2014)

Aplicando la formulación original del KBDI, (Keetch and Byram 1968), se obtuvo los valores del índice para la serie en estudio, el gráfico 23 muestra los resultados diarios del índice. Las líneas azul, verde, amarillo y rojo, especifican los límites de la clasificación de la alerta de riesgo de este índice. Esta clasificación inicialmente definida por Keetch and Byram, fue ajustada para el presente estudio, tabla 7, agregando una alerta más, para facilitar la comparación de los índices.

CALIFICACIÓN	RANGOS
BAJO	0-160
MODERADO	161-320
ALTO	321-480
MUY ALTO	481-640
EXTREMO	641-800

Tabla 7. Clasificación del riesgo de incendio en el KBDI

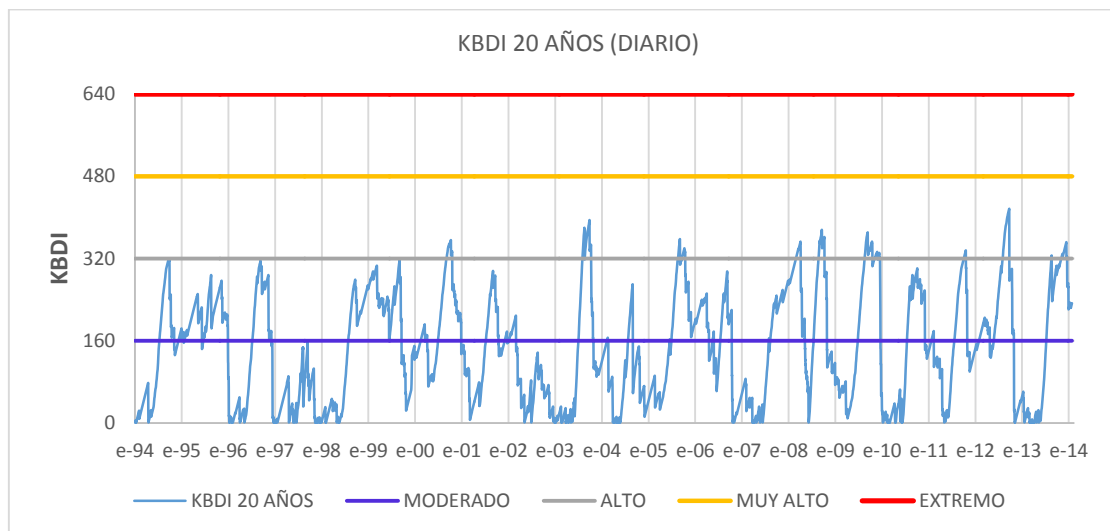


Gráfico 23. Valores diarios del KBDI en la cabecera del Júcar (1994-2014)

El KBDI presenta también una tendencia elevada en los meses de verano, aquí solo son necesarios valores de precipitación y temperatura los cuales disminuyen y aumentan respectivamente para esos meses, sin embargo los resultados diarios muestran que el índice alcanza solo valores calificados como ALTOS, según su escala de riesgo, que son 459 días de la serie en estudio, equivalente a un 6% de todos los días, pero al igual que el FWI, la mayoría de los días se sitúan en riesgo bajo, 55% para este índice.

Para el análisis mensual, en el gráfico 24 se muestra las medias mensuales, con la misma tendencia, pocos valores que alcanzan la calificación de riesgo ALTO, 13 meses, equivalente a un 5% del total de los meses en estudio, y con un 55% de los meses situados en la calificación de riesgo BAJA.

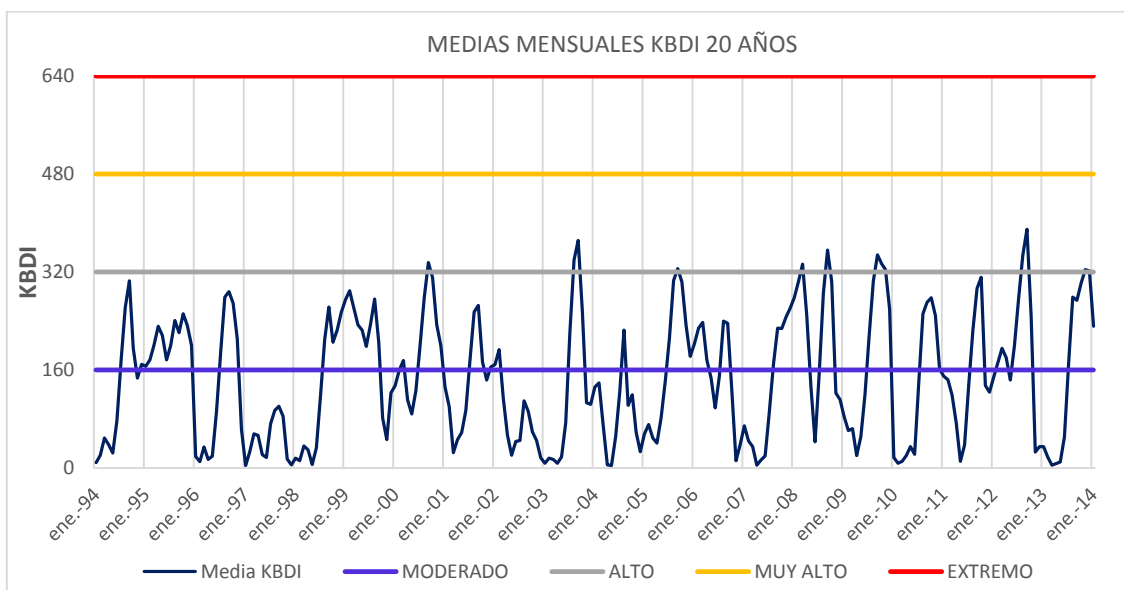


Gráfico 24. Valores medios del KBDI en la cabecera del Júcar (1994-2014)

Con los primeros resultados presentados se puede concluir que los dos índices a pesar de mostrar el incremento en los meses de verano, difieren en cuanto a la calificación de los mismos, mientras que el FWI, propone un mayor cuidado en verano, debido al riesgo EXTREMO, el KBDI, a pesar de mostrar valores en riesgo ALTO, no llega a situaciones críticas.

El FWI sin embargo cuenta con dos factores más, que influyen directamente en el riesgo de incendios, y que no se pueden dejar pasar por alto, la humedad relativa que influye en los códigos de humedad del combustible y la velocidad del viento primordiales en el índice de propagación del incendio (ISI), ambos, determinantes en la variación de los índices.

5.1.3 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

Para mostrar la influencia que tiene cada uno de los componentes que sirven de entrada para elaborar los índices, precipitación, temperatura, humedad relativa y velocidad del viento, se ha realizado un análisis de sensibilidad para cada uno, con porcentajes promedios de incremento y disminución de los mismos, que ha habido durante los años en estudio.

5.1.3.1 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD. TEMPERATURA (FWI)

Para el análisis de la temperatura, primero se evaluó en el periodo 1994 – 2014, cual fue el porcentaje máximo de variación de temperatura, tanto en aumento como en disminución de la misma, la variación presentada durante todos los meses en estudio fue del +/- 27%, equivalente a 3.6°C, si tenemos como referencia la media total de todos los meses. El gráfico 25 muestra la influencia de la temperatura en el FWI.

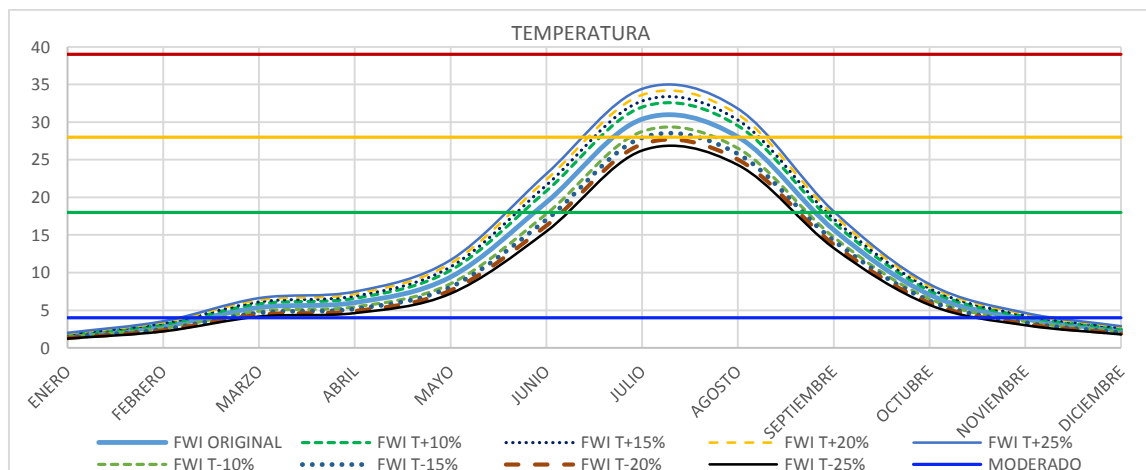


Gráfico 25. Análisis de sensibilidad de la temperatura en el FWI.

Con el porcentaje de variación definido, se ha elaborado el análisis haciendo una discretización de porcentajes, +/- (10%, 15%, 20% y 25%), lo que equivale a aumentar y disminuir, entre 0.96°C como mínimo y 19.27°C según sea el mes, tal como se muestra en la tabla 9. Los porcentajes por meses de las variaciones que tendría la temperatura con el análisis descrito se detallan en la siguiente tabla.

	T+10%	T+15%	T+20%	T+25%	T-10%	T-15%	T-20%	T-25%
ENERO	9%	12%	16%	19%	-10%	-14%	-19%	-24%
FEBRERO	9%	12%	16%	19%	-10%	-14%	-19%	-24%
MARZO	8%	12%	16%	19%	-9%	-14%	-18%	-23%
ABRIL	9%	13%	16%	19%	-9%	-14%	-19%	-23%
MAYO	9%	13%	16%	19%	-9%	-14%	-19%	-23%
JUNIO	7%	11%	14%	16%	-8%	-12%	-16%	-20%
JULIO	5%	7%	10%	12%	-5%	-8%	-11%	-14%
AGOSTO	5%	7%	10%	12%	-5%	-8%	-11%	-13%
SEPTIEMBRE	6%	9%	11%	14%	-6%	-9%	-12%	-15%
OCTUBRE	7%	10%	14%	16%	-8%	-12%	-15%	-19%
NOVIEMBRE	8%	11%	14%	17%	-9%	-13%	-17%	-22%
DICIEMBRE	9%	12%	16%	19%	-9%	-14%	-19%	-24%

Tabla 8. Valores porcentuales del análisis de sensibilidad de la temperatura en el FWI.

	VARIACIONES DE TEMPERATURA (°C)			
	10%	15%	20%	25%
ENERO	0.96	1.93	2.89	3.85
FEBRERO	1.16	2.32	3.48	4.64
MARZO	1.78	3.55	5.33	7.10
ABRIL	2.24	4.48	6.72	8.96
MAYO	3.06	6.11	9.17	12.23
JUNIO	4.18	8.35	12.53	16.70
JULIO	4.82	9.64	14.46	19.27
AGOSTO	4.74	9.48	14.22	18.96
SEPTIEMBRE	3.77	7.53	11.30	15.06
OCTUBRE	2.81	5.63	8.44	11.25
NOVIEMBRE	1.61	3.23	4.84	6.46
DICIEMBRE	1.13	2.26	3.38	4.51

Tabla 9. Valores medios mensuales de temperatura que se variaron para análisis de sensibilidad en el FWI.

La sensibilidad de la temperatura, muestra pequeñas variaciones, pero hay que entender que dichas variaciones dependen del mes en que se presenten, ya que un 20% de incremento de la temperatura del mes de Enero es mínimo, en comparación a un incremento del mismo porcentaje para los meses de verano.

5.1.3.2 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD. PRECIPITACIÓN (FWI)

El mismo procedimiento se realizó para la sensibilidad de la precipitación en el FWI, la variación presentada durante todos los meses en estudio fue del +/- 100%, equivalente a 40mm, si tenemos como referencia la media total de todos los meses. Esto sin tomar en cuenta que el aumento de la precipitación puede alcanzar valores muy altos, que alcanzan un incremento hasta del 190%. El gráfico 26 muestra la influencia de la temperatura en el FWI.

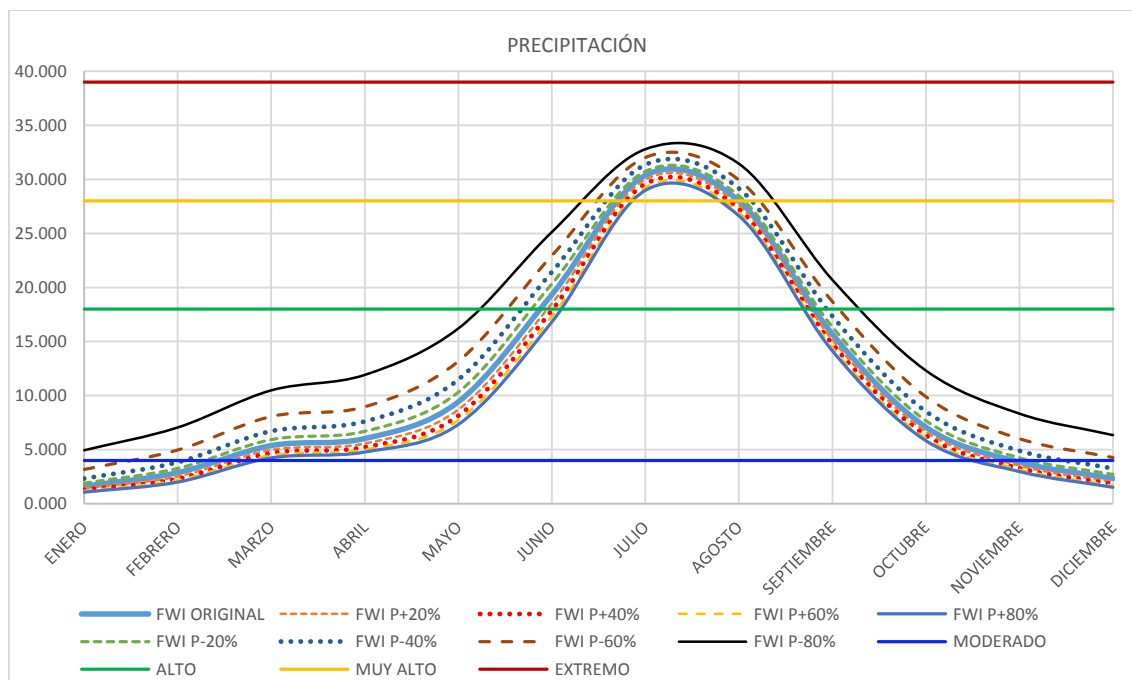


Gráfico 26. Análisis de sensibilidad de la precipitación en el FWI.

Para el análisis de la sensibilidad de la precipitación se discretizó en porcentajes más altos a diferencia de la temperatura, +/- (20%, 40%, 60% y 80%). Esta variación de porcentaje tiene una variación según el mes que se presente. En la tabla 10 se presenta los porcentajes por meses de las variaciones que tendría la precipitación, mientras que en la tabla 11, están los valores en milímetros de lluvia que varían según el mes y el porcentaje.

	P+20%	P+40%	P+60%	P+80%	P-20%	P-40%	P-60%	P-80%
ENERO	-11%	-19%	-27%	-34%	15%	31%	49%	67%
FEBRERO	-12%	-20%	-24%	-30%	12%	25%	42%	59%
MARZO	-7%	-13%	-17%	-21%	9%	20%	33%	49%
ABRIL	-7%	-13%	-17%	-21%	10%	21%	33%	49%
MAYO	-7%	-14%	-18%	-22%	9%	18%	28%	42%
JUNIO	-4%	-7%	-10%	-13%	5%	10%	16%	23%
JULIO	-1%	-3%	-4%	-5%	1%	3%	5%	7%
AGOSTO	-2%	-3%	-4%	-5%	2%	4%	6%	11%
SEPTIEMBRE	-3%	-6%	-8%	-10%	4%	10%	16%	24%
OCTUBRE	-6%	-11%	-14%	-18%	8%	17%	28%	43%
NOVIEMBRE	-8%	-14%	-18%	-23%	9%	21%	36%	54%
DICIEMBRE	-13%	-22%	-29%	-35%	14%	28%	45%	63%

Tabla 10. Valores porcentuales del análisis de sensibilidad de la precipitación en el FWI.

	VARIACIONES DE PRECIPITACION (mm)			
	20%	40%	60%	80%
ENERO	8.77	17.54	26.31	35.08
FEBRERO	6.27	12.53	18.80	25.07
MARZO	9.21	18.43	27.64	36.85
ABRIL	11.76	23.53	35.29	47.05
MAYO	9.82	19.64	29.46	39.27
JUNIO	5.92	11.83	17.75	23.67
JULIO	1.25	2.51	3.76	5.01
AGOSTO	3.55	7.09	10.64	14.18
SEPTIEMBRE	8.20	16.41	24.61	32.82
OCTUBRE	10.60	21.20	31.80	42.39
NOVIEMBRE	9.04	18.09	27.13	36.17
DICIEMBRE	10.34	20.69	31.03	41.38

Tabla 11. Valores medios mensuales de precipitación que se variaron para análisis de sensibilidad en el FWI.

La precipitación reflejó tener un poco más sensibilidad en el FWI que la temperatura, pero aún son variaciones mínimas, salvo el caso de los meses de invierno en donde una disminución en las precipitaciones conlleva a un incremento considerable de la calificación del riesgo de incendio, así mismo debido a que las variaciones porcentuales para el análisis varían en valores absolutos de acuerdo al mes, y habiendo precipitaciones considerables en los meses de invierno, los valores presentaran más variación al incremento o disminución de los mismos.

5.1.3.3 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD. HUMEDAD RELATIVA (FWI)

La humedad relativa presentó variaciones de hasta el +/- 27% durante los años en estudio, que corresponde a un 15%, de aumento y disminución, con respecto al 57% de humedad media, tomando en cuenta que la misma solo alcanza a un máximo de 100%.

En el gráfico 27 se presenta el análisis hecho para la humedad relativa.

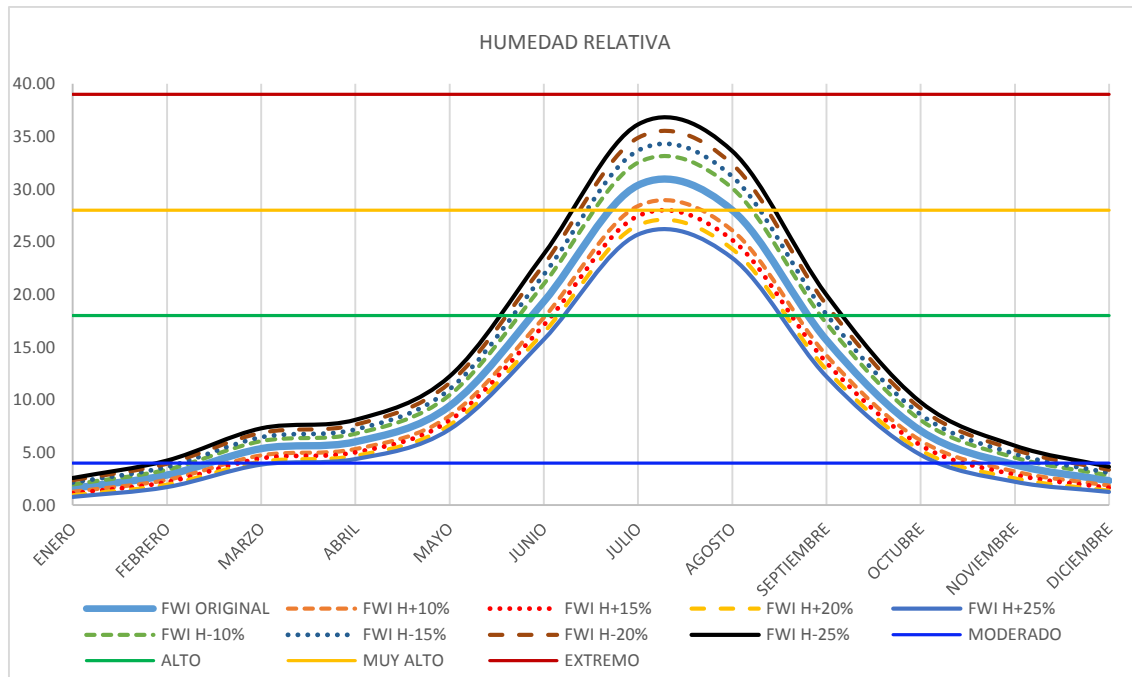


Gráfico 27. Análisis de sensibilidad de la humedad relativa en el FWI.

Para el análisis de la sensibilidad de la humedad relativa los porcentajes evaluados fueron los mismos que los de temperatura, +/- (10%, 15%, 20% y 25%), puesto que no existen variaciones muy altas para este parámetro, lo que equivale a aumentar y disminuir, entre el 7% como mínimo y 54% como máximo según el mes en el que se presente la variación. La tabla 12 muestra los valores porcentuales por meses de las variaciones que tiene la humedad relativa.

	H+10%	H+15%	H+20%	H+25%	H-10%	H-15%	H-20%	H-25%
ENERO	-20%	-31%	-41%	-51%	18%	25%	32%	38%
FEBRERO	-16%	-24%	-32%	-40%	15%	21%	27%	32%
MARZO	-12%	-17%	-23%	-28%	12%	17%	22%	26%
ABRIL	-11%	-17%	-22%	-27%	11%	16%	21%	26%
MAYO	-10%	-15%	-19%	-24%	10%	14%	19%	23%
JUNIO	-8%	-12%	-15%	-19%	8%	12%	15%	19%
JULIO	-7%	-10%	-13%	-15%	7%	10%	13%	16%
AGOSTO	-7%	-10%	-13%	-16%	7%	10%	14%	17%
SEPTIEMBRE	-9%	-14%	-18%	-22%	9%	13%	18%	21%
OCTUBRE	-13%	-20%	-26%	-32%	12%	18%	23%	28%
NOVIEMBRE	-17%	-25%	-33%	-42%	15%	21%	27%	32%

Tabla 12. Valores porcentuales del análisis de sensibilidad de la humedad relativa en el FWI.

VARIACIONES DE HUMEDAD RELATIVA (%)				
	10%	15%	20%	25%
ENERO	15	29	44	59
FEBRERO	13	25	38	51
MARZO	12	23	35	46
ABRIL	11	23	34	45
MAYO	11	21	32	42
JUNIO	9	17	26	34
JULIO	7	15	22	29
AGOSTO	8	16	24	32
SEPTIEMBRE	10	21	31	41
OCTUBRE	13	26	39	51
NOVIEMBRE	14	28	42	56
DICIEMBRE	15	29	44	59

Tabla 13. Valores medios mensuales de humedad relativa que se variaron para análisis de sensibilidad en el FWI.

Al igual que la temperatura y la precipitación, la humedad presenta una sensibilidad mínima en el FWI, para los meses de verano, que son los meses fundamentales para la gestión de la época de incendios, puesto que son en estos meses en los que para la zona de estudio se presentan los valores más bajos del año.

5.1.3.4 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD. VELOCIDAD DEL VIENTO (FWI)

Las variaciones que presentó la velocidad del viento en el análisis de los datos en estudio fueron del +/- 63%, que corresponde a un aumento y disminución de 4.7 km/h, con respecto la velocidad media, 7.58 km/h. El gráfico 28 muestra la sensibilidad de la velocidad del viento en el FWI.

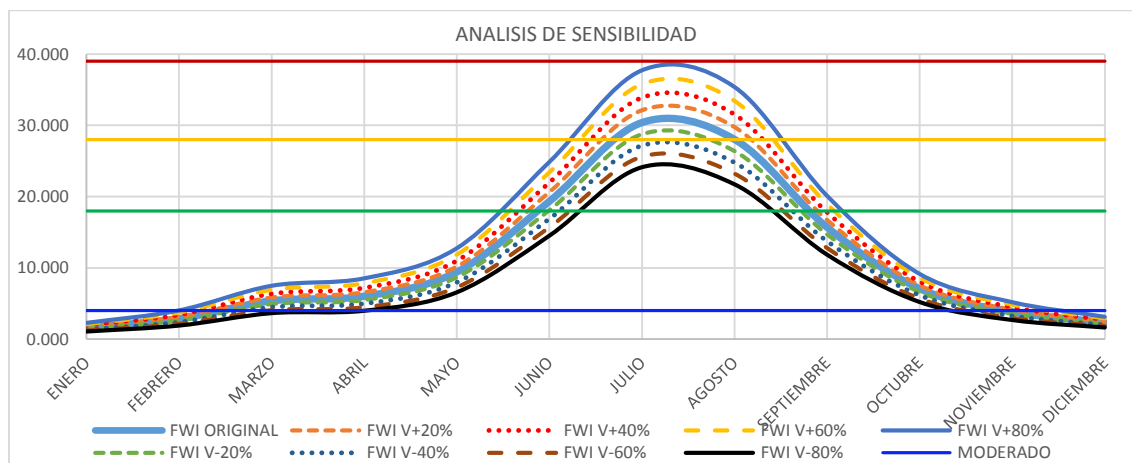


Gráfico 28. Análisis de sensibilidad de la velocidad del viento en el FWI.

Al igual que la precipitación, la velocidad del viento se analizó con porcentajes más altos debido a los incrementos mostrados en el análisis de los datos, +/- (20%, 40%, 60% y 80%), que corresponden a elevar y disminuir la misma entre 1.3 km/h y 6.9 km/h dependiendo del mes como se detalla en la tabla 15. A continuación se muestran los valores de variación que presenta la velocidad del viento en porcentajes.

	V+20%	V+40%	V+60%	V+80%	V-20%	V-40%	V-60%	V-80%
ENERO	9%	16%	23%	30%	-9%	-17%	-26%	-34%
FEBRERO	9%	16%	23%	29%	-9%	-17%	-26%	-34%
MARZO	8%	16%	22%	28%	-9%	-17%	-24%	-32%
ABRIL	9%	16%	23%	30%	-9%	-17%	-26%	-34%
MAYO	8%	14%	21%	26%	-8%	-15%	-23%	-30%
JUNIO	6%	12%	17%	22%	-6%	-13%	-19%	-25%
JULIO	5%	10%	15%	19%	-5%	-11%	-16%	-21%
AGOSTO	6%	11%	16%	21%	-6%	-12%	-17%	-22%
SEPTIEMBRE	6%	12%	17%	22%	-6%	-12%	-18%	-25%
OCTUBRE	6%	12%	18%	23%	-7%	-13%	-20%	-27%
NOVIEMBRE	8%	14%	20%	26%	-8%	-15%	-23%	-30%
DICIEMBRE	7%	14%	20%	26%	-8%	-15%	-23%	-30%

Tabla 14. Valores porcentuales del análisis de sensibilidad de la velocidad del viento en el FWI.

VARIACIONES DE LA VELOCIDAD DEL VIENTO (Km/h)				
	20%	40%	60%	80%
ENERO	1.4	2.8	4.1	5.5
FEBRERO	1.5	3.0	4.5	6.0
MARZO	1.7	3.3	5.0	6.7
ABRIL	1.7	3.4	5.2	6.9
MAYO	1.6	3.2	4.9	6.5
JUNIO	1.6	3.2	4.8	6.4
JULIO	1.5	3.1	4.6	6.2
AGOSTO	1.6	3.3	4.9	6.6
SEPTIEMBRE	1.5	3.0	4.6	6.1
OCTUBRE	1.3	2.6	4.0	5.3
NOVIEMBRE	1.3	2.7	4.0	5.3
DICIEMBRE	1.3	2.7	4.0	5.4

Tabla 15. Valores medios mensuales de velocidad del viento que se variaron para análisis de sensibilidad en el FWI.

Como se muestra en el gráfico 28, la sensibilidad de a velocidad de viento en la temporada de incendios incrementa en comparación al resto de meses, cabe indicar que el viento afecta de forma directa a la expansión del incendio, por lo que su influencia cuenta a partir de que haya ocurrido la ignición del fuego.

5.1.3.5 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD. TEMPERATURA Y PRECIPITACIÓN (KBDI)

Para el KBDI los componentes en análisis son solo temperatura y precipitación, así, los criterios utilizados son los mismos que en el FWI, esto quiere decir, que la discretización de los porcentajes de aumento y disminución, para dichos componentes, son las mismas.

Primero en el gráfico 29 se presenta los resultados del análisis de sensibilidad hecho para la temperatura.

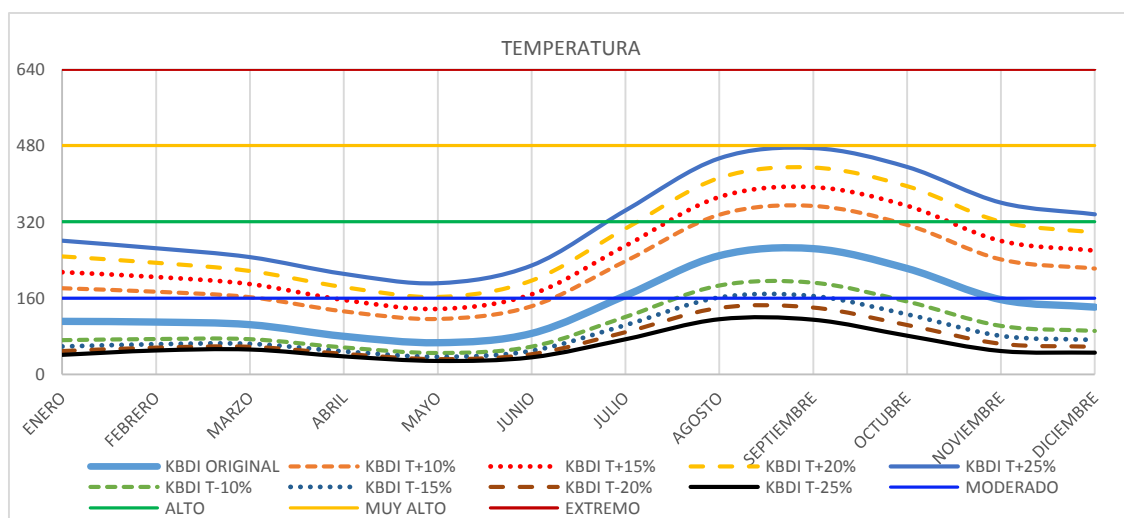


Gráfico 29. Análisis de sensibilidad de la temperatura en el KBDI.

Para este índice, la sensibilidad en la temperatura muestra valores considerables de variaciones, y más aún cuando la misma se eleva. Con un incremento medio de 2°C, es suficiente para que los valores se eleven más del 25%, siendo en los meses de verano, los incrementos más significativos en valores absolutos.

El análisis se presenta en la siguiente tabla, en valores porcentuales.

	T+10%	T+15%	T+20%	T+25%	T-10%	T-15%	T-20%	T-25%
ENERO	38%	48%	55%	60%	-36%	-47%	-56%	-63%
FEBRERO	37%	46%	53%	59%	-33%	-42%	-49%	-54%
MARZO	36%	45%	52%	58%	-29%	-39%	-45%	-50%
ABRIL	39%	49%	56%	62%	-30%	-40%	-46%	-53%
MAYO	43%	52%	59%	65%	-33%	-45%	-52%	-58%
JUNIO	40%	49%	56%	62%	-32%	-43%	-51%	-58%
JULIO	30%	39%	46%	52%	-27%	-37%	-46%	-55%
AGOSTO	26%	33%	40%	45%	-25%	-35%	-44%	-54%
SEPTIEMBRE	25%	33%	39%	44%	-27%	-38%	-47%	-57%
OCTUBRE	29%	37%	44%	49%	-31%	-43%	-53%	-63%
NOVIEMBRE	35%	44%	51%	56%	-35%	-48%	-59%	-69%
DECIEMBRE	36%	46%	53%	58%	-36%	-49%	-59%	-68%

Tabla 16. Valores porcentuales del análisis de sensibilidad de la temperatura en el KBDI.

Lo mostrado en la tabla 16, refleja la alta sensibilidad de la temperatura en este índice, ya que son la mayoría de los valores se pintan de amarillo, subiendo la calificación de riesgo en casi todos los meses. A continuación en el gráfico 30, se muestra el análisis de sensibilidad hecho para la precipitación.

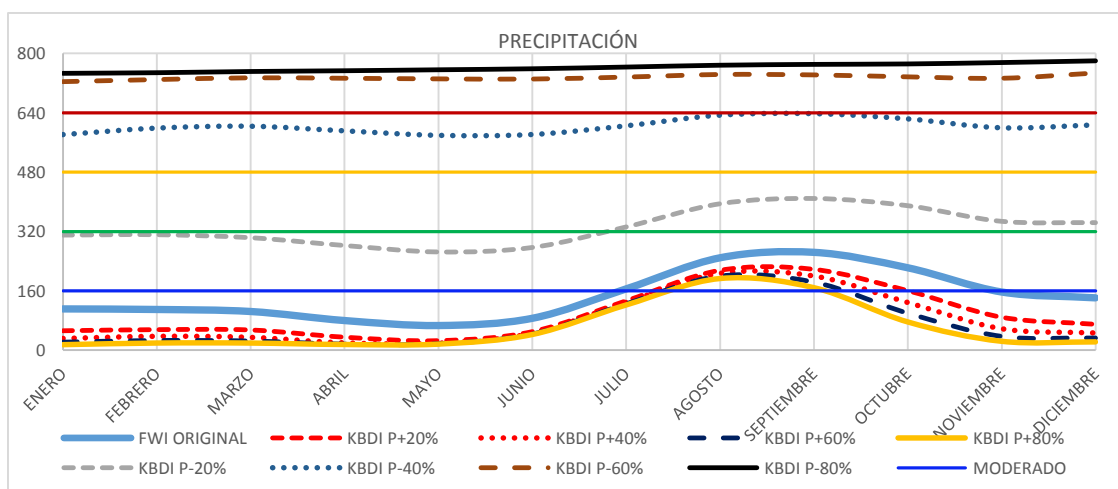


Gráfico 30. Análisis de sensibilidad de la precipitación en el KBDI.

La sensibilidad en la precipitación que muestra el gráfico anterior, se puede apreciar cuan influyente es la misma en este índice, aplicando una disminución media de 10mm a los valores, en época de verano, superan el 100% de incremento del índice, y en una situación crítica de disminución considerable de precipitaciones el índice tiende a alcanzar el valor EXTREMO de 800. La tabla 17 muestra los incrementos en porcentaje del análisis de sensibilidad de la precipitación

	P+20%	P+40%	P+60%	P+80%	P-20%	P-40%	P-60%	P-80%
ENERO	-53%	-71%	-80%	-87%	179%	423%	551%	572%
FEBRERO	-49%	-66%	-76%	-83%	184%	446%	565%	582%
MARZO	-48%	-67%	-76%	-82%	191%	479%	604%	621%
ABRIL	-56%	-75%	-79%	-81%	253%	641%	818%	844%
MAYO	-61%	-71%	-74%	-76%	298%	772%	1001%	1039%
JUNIO	-42%	-47%	-49%	-51%	222%	577%	751%	784%
JULIO	-19%	-22%	-24%	-26%	101%	266%	346%	362%
AGOSTO	-13%	-17%	-20%	-23%	59%	154%	199%	209%
SEPTIEMBRE	-17%	-24%	-30%	-36%	55%	142%	182%	192%
OCTUBRE	-28%	-42%	-55%	-66%	76%	181%	232%	248%
NOVIEMBRE	-43%	-63%	-76%	-85%	122%	283%	368%	395%
DICIEMBRE	-50%	-67%	-77%	-84%	144%	331%	430%	453%

Tabla 17. Valores porcentuales del análisis de sensibilidad de la precipitación en el KBDI.

Tal como se muestra en el gráfico 30, la tabla 17 presenta en valores la elevada sensibilidad de la precipitación en este índice. Muy influyente se muestra cuando las mismas disminuyen, ya que en todos los meses estudiados alcanzaron a elevar la calificación del riesgo de incendio.

5.1.4 INTERVALO DE CONFIANZA PARA LOS ÍNDICES FWI Y KBDI

Debido a que estos índices muestran una variabilidad, muchas veces considerable, en los días de estudio, se ha realizado el cálculo del intervalo de confianza para cada uno. Consiste en asignar un valor absoluto medio para cada uno de los meses, y así saber aproximadamente cuanto puede subir o bajar el valor final del índice con respecto a la media del mismo.

El FWI fue el índice que más presento variación en sus días dentro de cada mes, por lo que se ha realizado un estudio a los valores mínimos y máximos, se calcularon una y dos variaciones estándar, equivalentes a él percentil 70 y 95%, que nos permitieron saber el

promedio o variación esperada con respecto a la media de los valores obtenidos de la serie diaria.

En los siguientes gráficos 31, 32 y 33 se presentan la curva media de todos los meses para la serie en estudio junto con los intervalos de confianza de las variaciones estándar y de los valores mínimos y máximos, respectivamente.

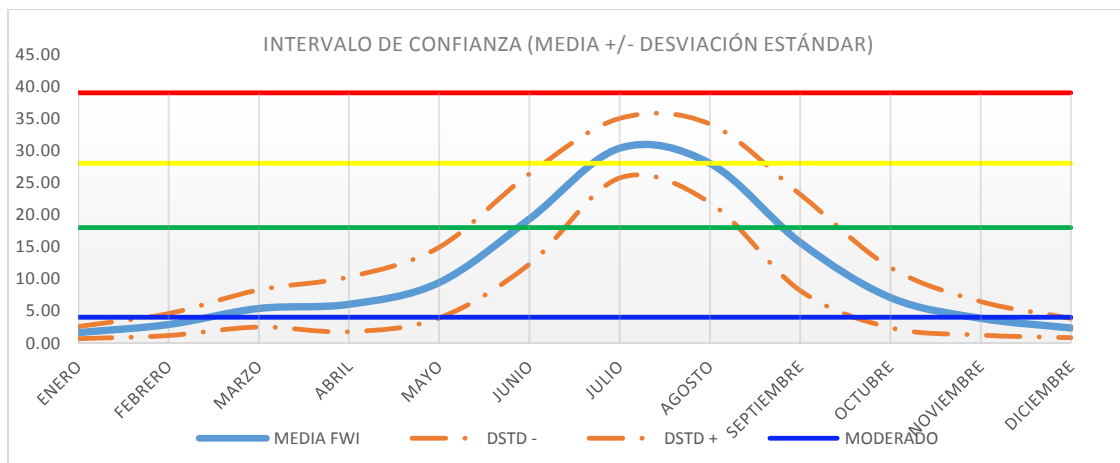


Gráfico 31. Intervalo de confianza del FWI – media +/- desviación estándar.

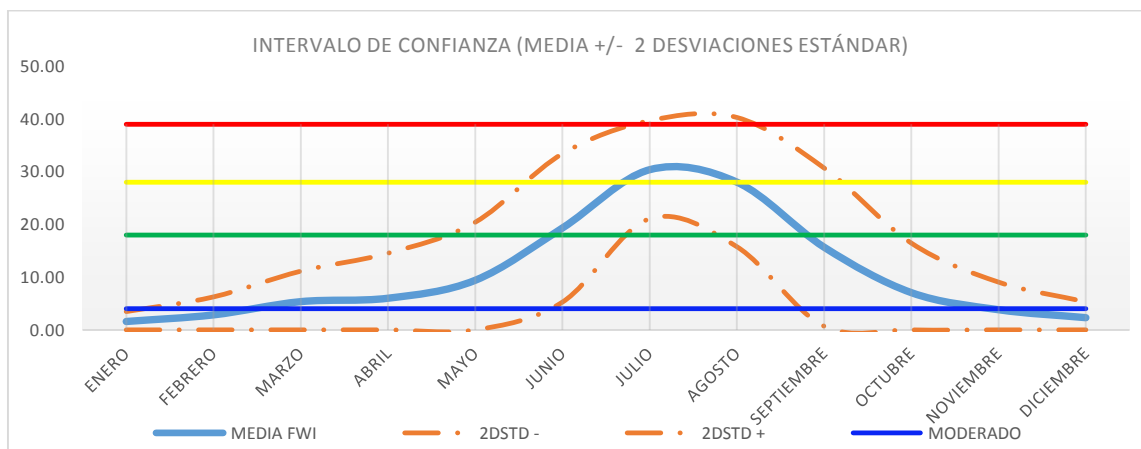


Gráfico 32. Intervalo de confianza del FWI – media +/- 2 desviaciones estándar.

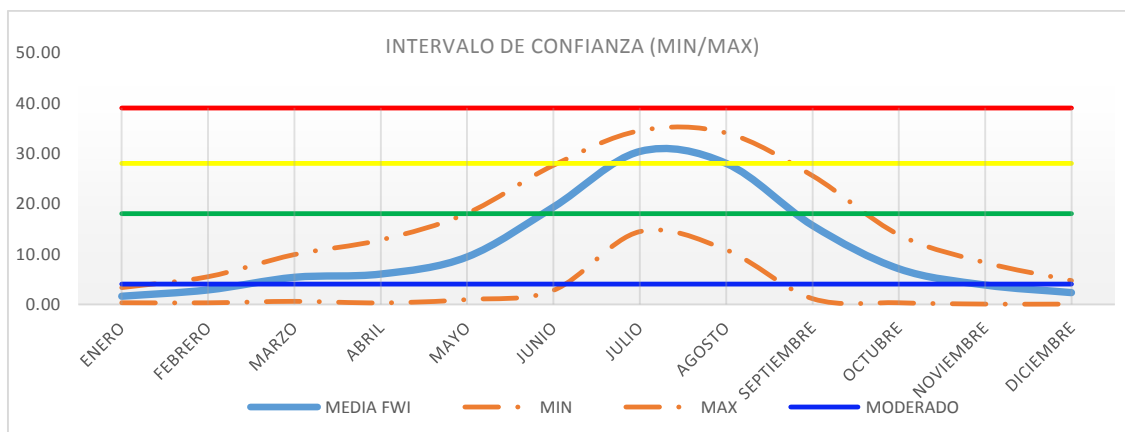


Gráfico 33. Intervalo de confianza del FWI – valores mínimos y máximos.

Se puede apreciar en todos los intervalos, que los meses más fríos, la misma se va estrechando, por lo que tenemos que en los meses de verano tiende a haber más diferencia debido a los altos valores que se alcanzan.

Los valores que fueron calculados estadísticamente para el análisis del intervalo de confianza del FWI se detallan a continuación en las tablas 18, 19 y 20.

MESES	DSTD -	DSTD +
ENERO	-0.93	0.93
FEBRERO	-1.69	1.69
MARZO	-2.88	2.88
ABRIL	-4.26	4.26
MAYO	-5.49	5.49
JUNIO	-7.03	7.03
JULIO	-4.64	4.64
AGOSTO	-6.12	6.12
SEPTIEMBRE	-7.50	7.50
OCTUBRE	-4.68	4.68
NOVIEMBRE	-2.60	2.60
DICIEMBRE	-1.49	1.49

Tabla 18. Valores del intervalo de confianza del FWI – media +/- desviación estándar.

MESES	2 DSTD -	2 DSTD +
ENERO	-1.86	1.86
FEBRERO	-3.39	3.39
MARZO	-5.76	5.76
ABRIL	-8.51	8.51
MAYO	-10.98	10.98
JUNIO	-14.06	14.06
JULIO	-9.28	9.28
AGOSTO	-12.25	12.25
SEPTIEMBRE	-14.99	14.99
OCTUBRE	-9.36	9.36
NOVIEMBRE	-5.20	5.20
DICIEMBRE	-2.99	2.99

Tabla 19. Valores del intervalo de confianza del FWI – media +/- 2 desviaciones estándar.

MESES	MIN	MAX
ENERO	-1.29	1.72
FEBRERO	-2.57	2.63
MARZO	-4.78	4.52
ABRIL	-5.73	6.79
MAYO	-8.47	8.69
JUNIO	-16.54	8.31
JULIO	-15.94	4.14
AGOSTO	-17.18	6.05
SEPTIEMBRE	-14.55	9.88
OCTUBRE	-6.77	6.76
NOVIEMBRE	-3.79	4.47
DICIEMBRE	-2.29	2.39

Tabla 20. Valores del intervalo de confianza del FWI – mínimos y máximos.

Para el cálculo del intervalo en el KBDI, solo se necesitó de los valores mínimos y máximos del mismo, tiene menos variación en los días a diferencia del FWI, y no fue necesario el realizaran un análisis estadístico con desviaciones estándar. En el siguiente gráfico se presenta la banda para el índice KBDI.

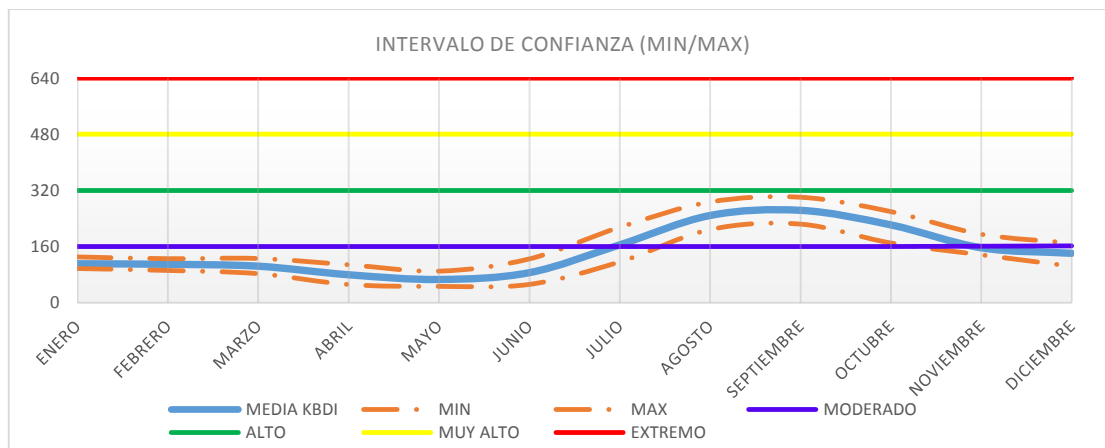


Gráfico 34. Intervalo de confianza del KBDI – valores mínimos y máximos.

Así mismo en los meses de verano, el intervalo se ensancha, pero las variaciones de los mínimos y máximos con respecto a la media son muy bajas, como se puede apreciar en la tabla 21.

MESES	MIN	MAX
ENERO	-14	20
FEBRERO	-18	16
MARZO	-22	22
ABRIL	-28	29
MAYO	-20	24
JUNIO	-34	39
JULIO	-49	50
AGOSTO	-40	38
SEPTIEMBRE	-40	37
OCTUBRE	-52	38
NOVIEMBRE	-20	39
DICIEMBRE	-37	29

Tabla 21. Valores del intervalo de confianza del KBDI – mínimos y máximos.

5.2 ADAPTACIÓN MENSUAL DE LOS ÍNDICES

La modificación de los índices, como está explicado en el capítulo 3, sirvió para ajustar los resultados anteriormente obtenidos de la serie diaria, y así, se ha elaborado una propuesta de cambio del KBDI y FWI a escala mensual, para futuros estudios que necesiten como entrada, una serie mensual de datos como precipitación y temperatura.

5.2.1 FIRE WEATHER INDEX (FWI) 1994-2014 (DATOS MENSUALES)

Con la modificación realizada a la formulación de los códigos de humedad del suelo en cada uno de los códigos que componen el índice se obtuvo una curva mensual que se muestra en el gráfico 35.

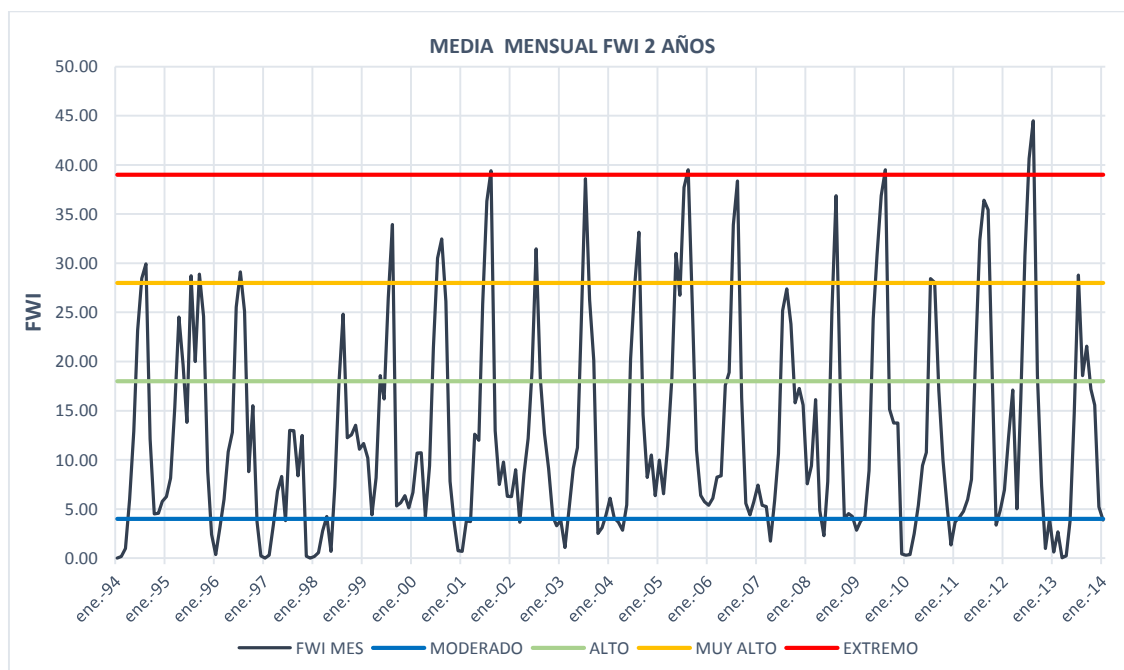


Gráfico 35. Valores mensuales del FWI. Serie 1994 – 2014

Una vez obtenido estos resultados se comparan con la curva del índice diario, y se comprueba si ajustan para dar como válidos las modificaciones que se le han hecho al índice. La comparación de estos dos resultados se muestra a continuación.

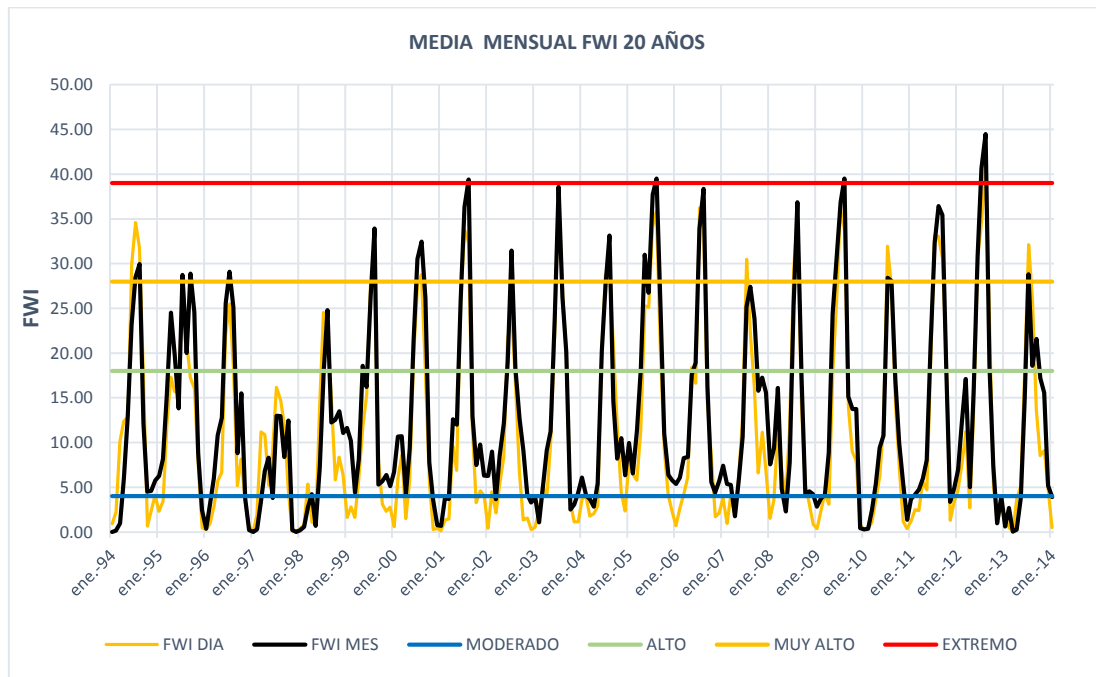


Gráfico 36. FWI diario vs. FWI mensual ajustado

En el gráfico 36 vemos como las dos curvas se ajustan, y mediante el cálculo de los coeficientes de correlación y de Pearson, tenemos que $r = 0.9$, para los dos coeficientes, lo que nos da una correlación positiva que muestra que el 90% de los datos se relacionan entre sí.

Observamos también que se ajustan en los picos que tiene el índice, es decir en los meses de verano donde alcanzan los valores más altos, en el gráfico 37, se detalla únicamente los ajustes en los meses de verano para la serie en estudio.

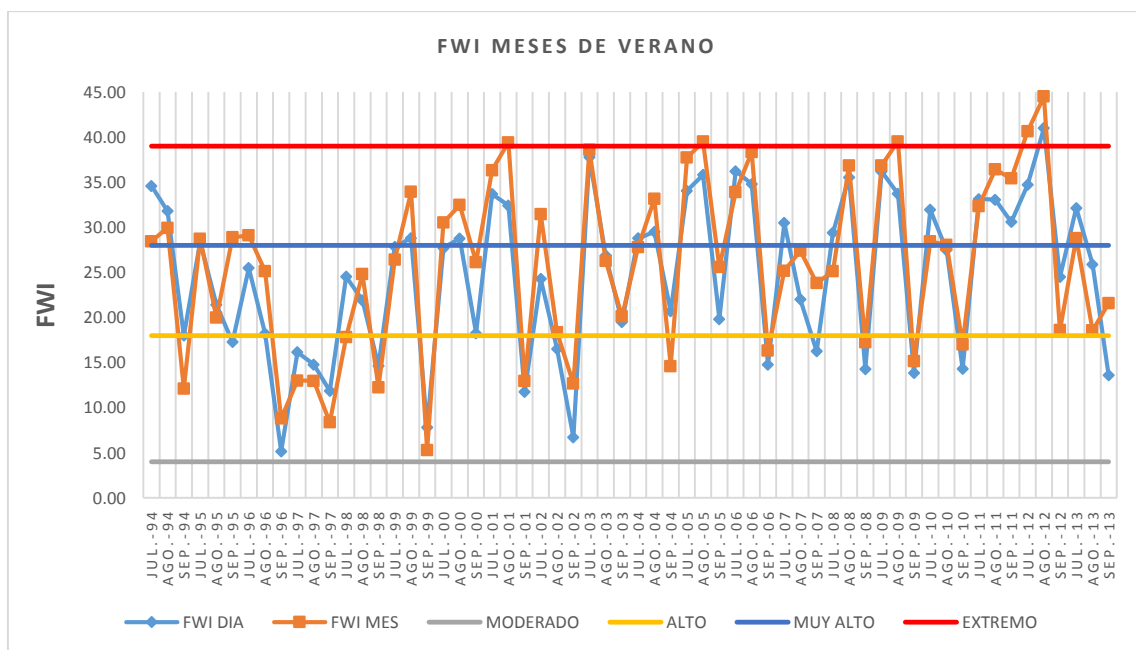


Gráfico 37. FWI diario vs. FWI mensual ajustado (meses de verano)

Los meses que más fallos tuvieron como el caso de septiembre de 1995 y 2000 fue debido a que hubieron precipitaciones durante los días del mes que hicieron que descendiera la media en el análisis diario de los datos, mientras que en el ajustado, al no haber sido la precipitación acumulada partida por los días del mes tan significativa, el valor fue tomado por completo para la resta de la lluvia neta, haciéndose cero y que conllevó a un aumento en el índice para este mes.

Para los meses que no alcanzaron el pico de riesgo como es el caso de julio del 2007, 2010 y 2013, fue debido a que las lluvias de junio se concentraron en los primeros 15 días, a partir de ahí el índice fue creciendo, alcanzando picos en todos los días del mes de julio que fueron muy secos. Mientras que con el índice ajustado, se tomaron los valores de precipitaciones de esos 15 primeros días reduciendo el índice y ubicándolo por debajo de los valores del índice diario.

5.2.2 KEETCH AND BYRAM INDEX (KBDI) 1994-2014 (DATOS MENSUALES)

Para el KBDI, solo se realizó modificaciones en un solo componente, la cantidad de lluvia neta ajustada, como se detalla en la metodología, una vez ingresado los datos de precipitación y temperatura, los resultados obtenidos fueron los que se muestran en el gráfico 38.

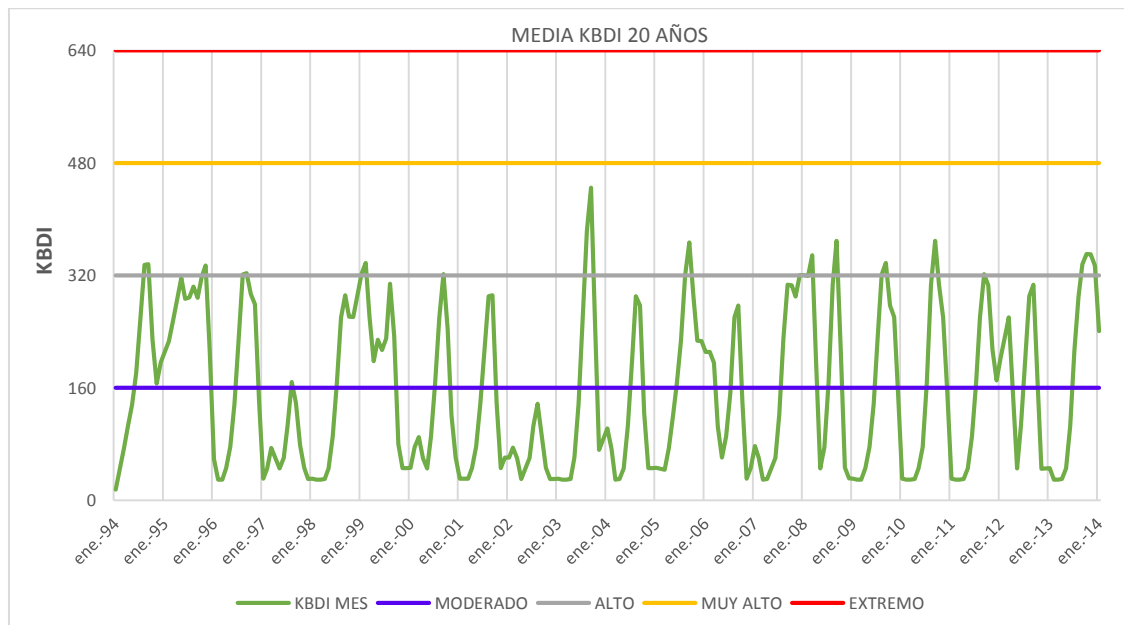


Gráfico 38. Valores mensuales del KBDI. Serie 1994 - 2014

Así mismo, estos resultados se contrastan con los obtenidos para el índice diario para validar las modificaciones hechas. Gráfico 39.

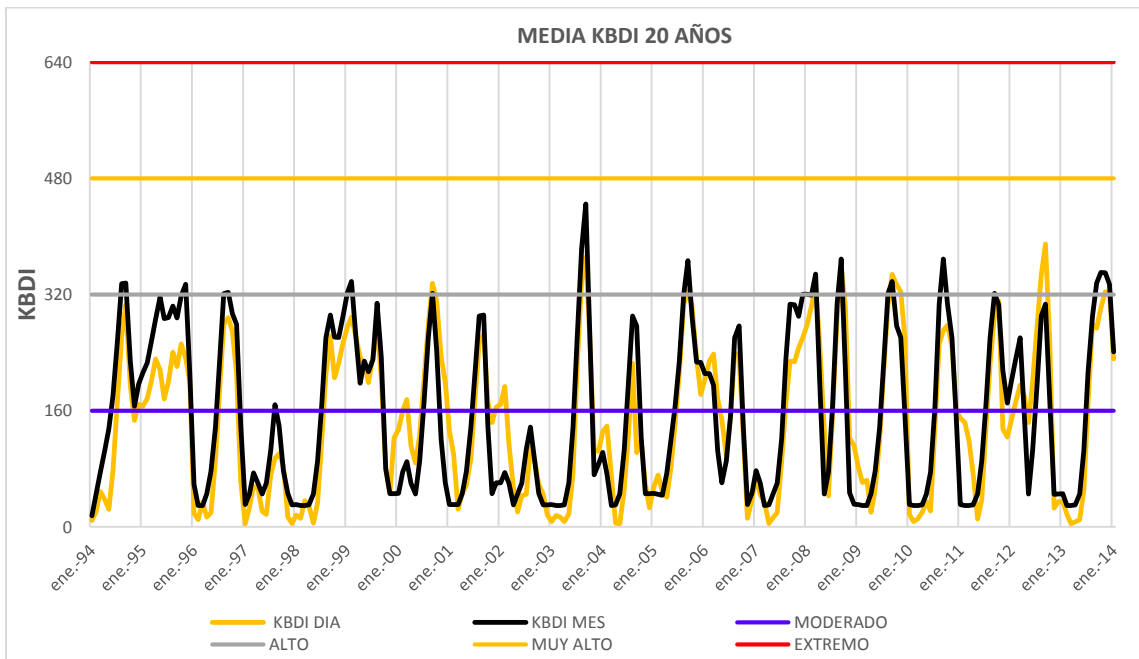


Gráfico 39. KBDI diario vs. KBDI mensual ajustado

Para este índice las curvas llevan la misma tendencia, y ajustan, pero se nota más diferencia que en el FWI, de forma que al calcular el coeficiente de correlación y Pearson los dos difieren, el r del primero es igual a 0.9 y el del segundo 0.8. Como conclusión está que las dos correlaciones son positivas tan solo que hay una diferencia del 10%.

El KBDI ajusta también los picos de verano, al igual que el anterior descrito se puede observar en el gráfico 40 que no se tendrá problema en la temporada de incendios para identificar los riesgos más altos de incendios forestales.

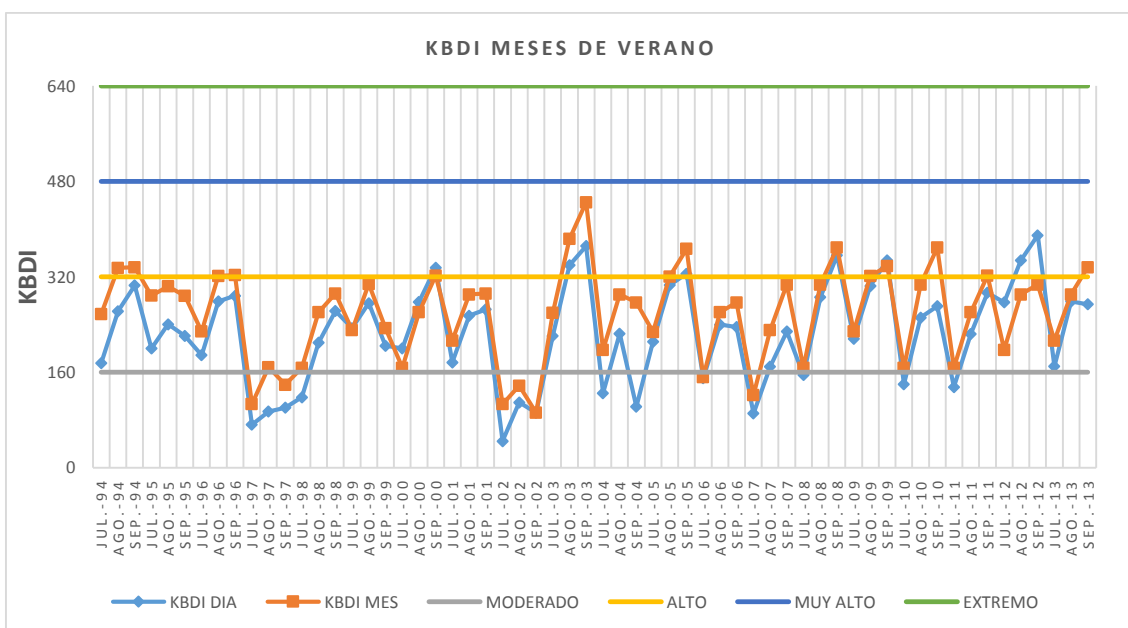


Gráfico 40. KBDI diario vs. KBDI mensual ajustado (meses de verano)



Para el caso del mes de septiembre del 2004, en el cual se nota un mayor desajuste, fue debido a que al ser muy sensible este índice a la precipitación, las lluvias en ese mes se acumularon los primeros días, descendiendo los niveles para todo el mes, y por ende la media, mientras que en el ajustado la precipitación acumulada dividida para los días del mes no fue suficientemente influyente para lograr descender hasta los valores que realmente dieron.

Mientras que en agosto y septiembre del 2012, donde el ajustado no alcanzó los picos reales del índice, analizando los datos, se concluye que es debido a que en el mes de julio solo hubo una precipitación considerable durante los 31 días del mes, en agosto no llovió y en septiembre al igual que julio, solo hubo una y al final del mes, esto hizo que los valores del índice diario incrementaran, por el contrario del ajustado, que al ser la precipitación de julio considerable, descendió los valores medios del índice, quedando por debajo del diario.

Una vez analizado las modificaciones y validadas de acuerdo a los resultados que se ajustaron para la gran mayoría de los valores de la serie diaria, se concluye que se ha llegado a ajustar de forma correcta los índices y que estos, pueden ser utilizados para el análisis mensual.

5.3 CÁLCULO MENSUAL (SERIE HISTÓRICA)

Para esta etapa del estudio, se hizo ya la utilización de los índices FWI y KBDI mensuales. Con los mismos, se evaluó la serie histórica desde 1940 hasta el 2012, de temperatura y precipitación en la zona de estudio, ahora sí por años hidrológicos.

5.3.1 FWI SERIE HISTÓRICA 1940 - 2012

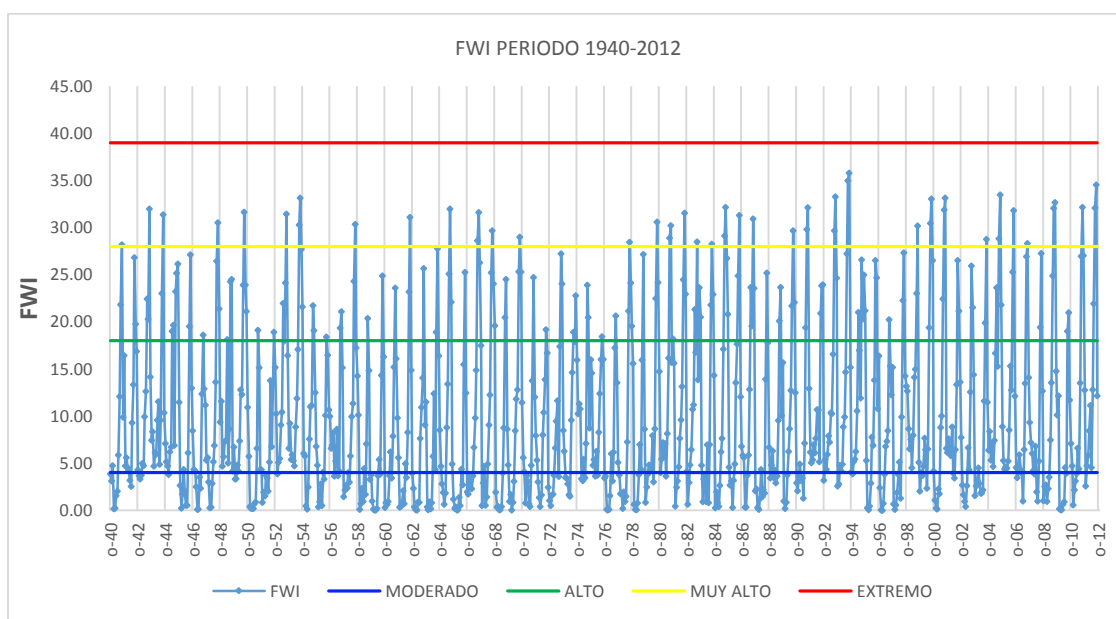


Gráfico 41. FWI mensual (serie histórica 1940 – 2012)

Los resultados presentados en el gráfico 41, corresponden a la serie histórica 1940 - 2012 de la zona de estudio, la cual registra una media anual de 106 incendios perjudicando a más de 1500 hectáreas en promedio, una cifra alta teniendo en cuenta que los grandes incendios se consideran a partir de 200 hectáreas quemadas.

Con el FWI podemos observar que 68 del total de meses, es decir el 6%, llegan a la calificación de riesgo ALTO, teniendo como valor máximo el alcanzado en julio de 1994. Mientras que un 47% de todos los meses, se mantienen en riesgo MODERADO.

Haciendo una comparativa de resultados, esta vez de forma anual para tener una idea de lo que los resultados que se han mostrado en el gráfico 41 se ajustan a lo que se ha registrado en el Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (MAGRAMA), fueron calculadas medias anuales de la serie histórica y se contrastaron con los registros de incendios en la provincia de Cuenca, a partir de 1968, que es el año inicial que el MAGRAMA comienza a realizar estos informes.

En los siguientes gráficos se hacen la comparativa de los valores medios, máximos y el promedio de los meses de verano para cada año en estudio, contra el número de siniestros ocurridos y la superficie quemada durante gran parte de la serie histórica.

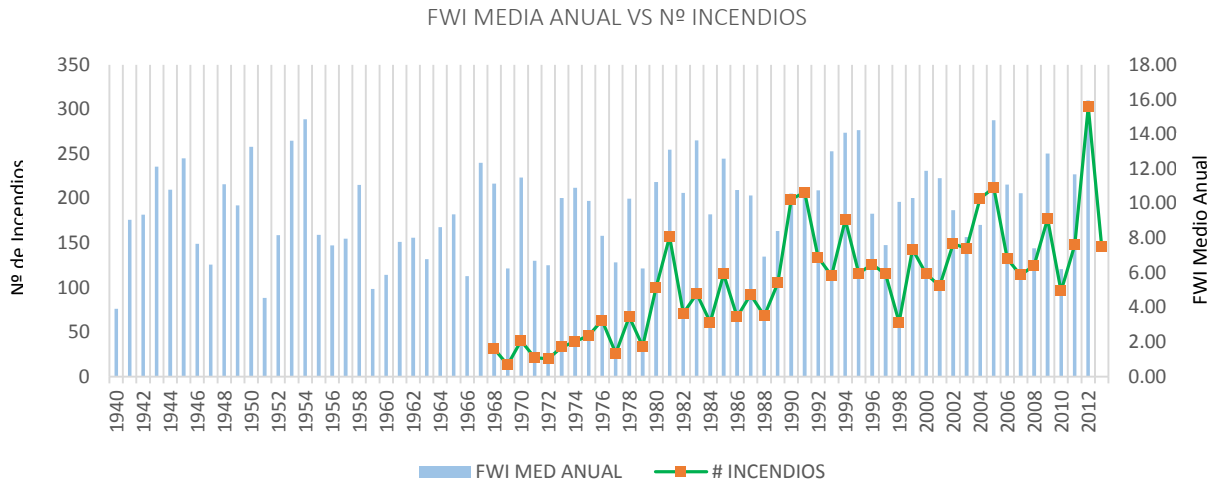


Gráfico 42. FWI media anual (serie histórica 1940 – 2012) vs. Número de incendios en la provincia de cuenca (1968 – 2013)

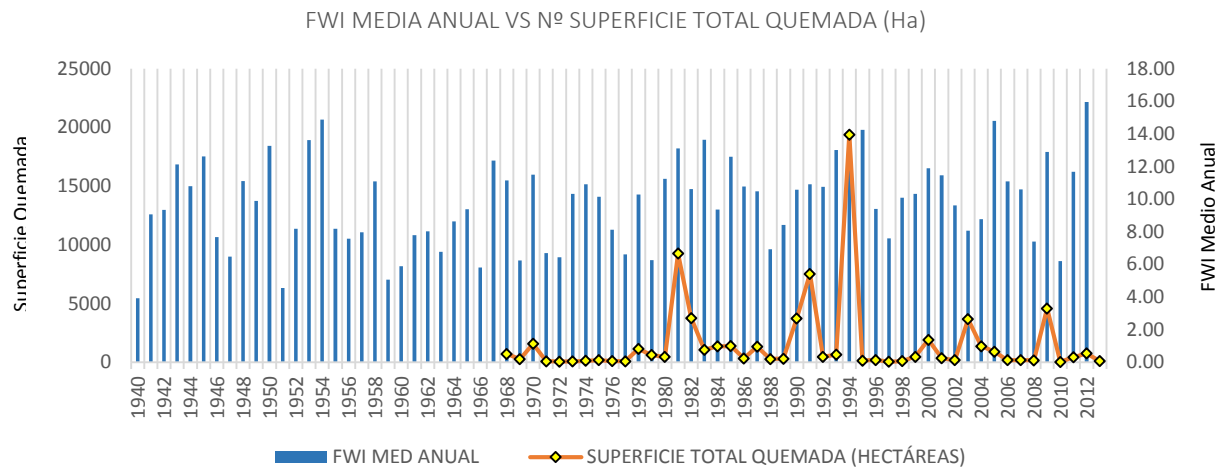


Gráfico 43. FWI media anual (serie histórica 1940 – 2012) vs. Superficie forestal total quemada en la provincia de cuenca (1968 – 2013)

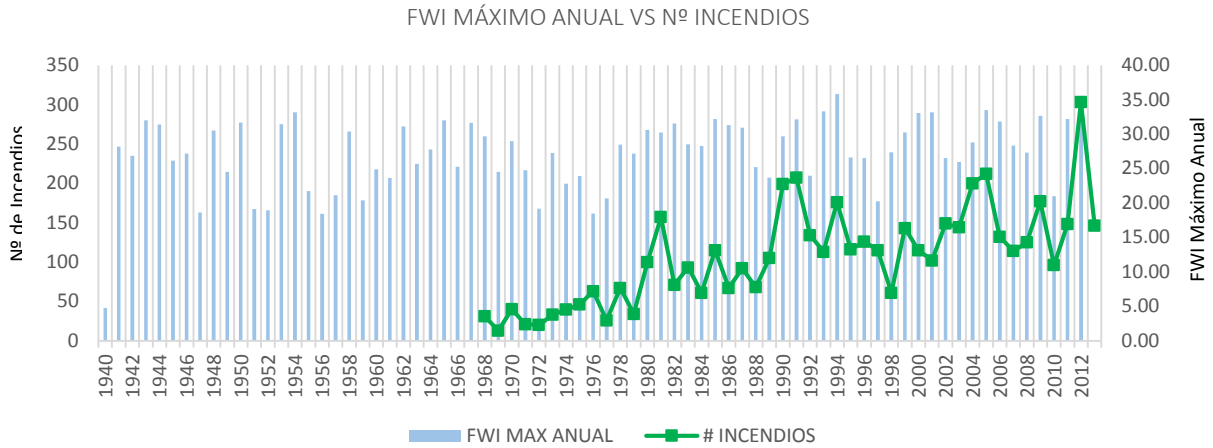


Gráfico 44. FWI máximo anual (serie histórica 1940 – 2012) vs. Número de incendios en la provincia de cuenca (1968 – 2013)

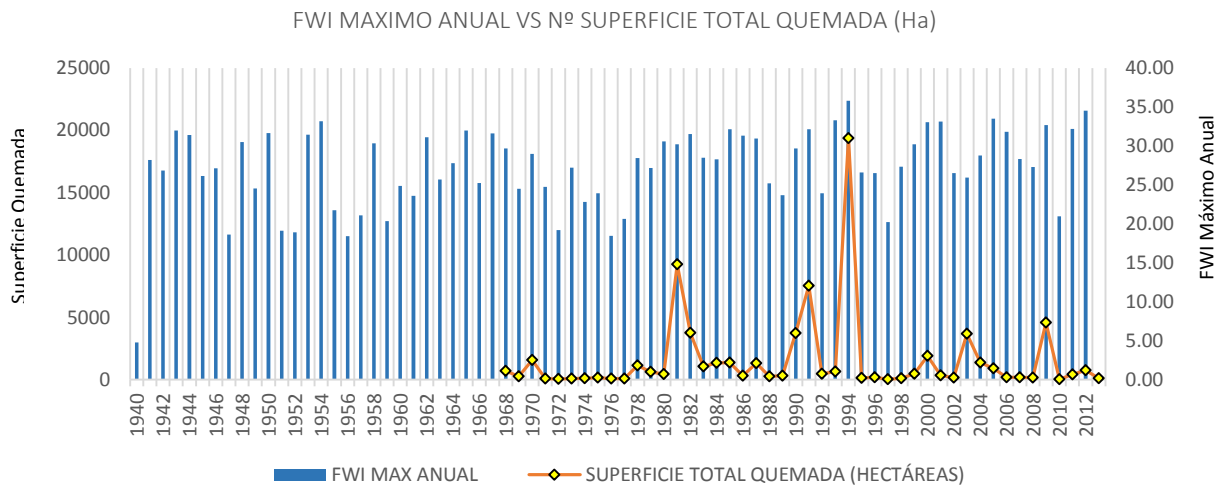


Gráfico 45. FWI máximo anual (serie histórica 1940 – 2012) vs. Superficie forestal total quemada en la provincia de cuenca (1968 – 2013)

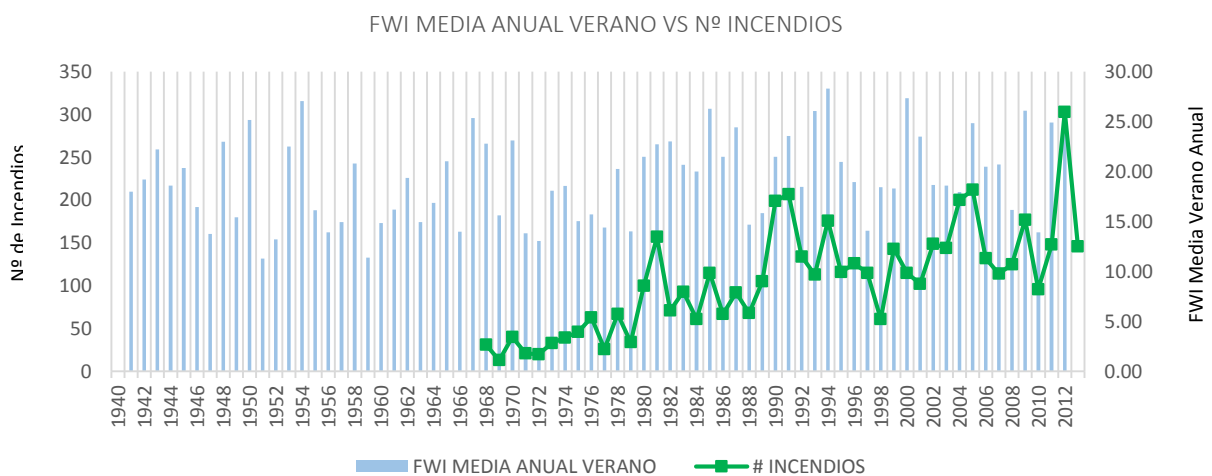


Gráfico 46. FWI media anual verano (serie histórica 1940 – 2012) vs. Número de incendios en la provincia de cuenca (1968 – 2013)

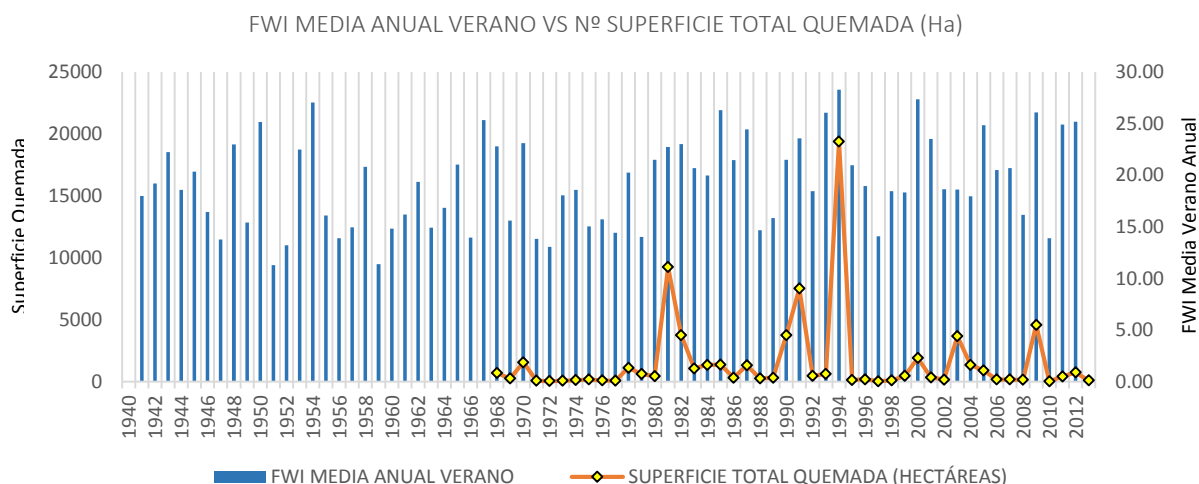


Gráfico 47. FWI media anual verano (serie histórica 1940 – 2012) vs. Superficie forestal total quemada en la provincia de cuenca (1968 – 2013)

Como se puede observar en todas las comparativas el índice registra los picos de valores extremos, aunque por separado, de los años 1994, el año que en más hectáreas se vieron afectadas por los incendios y el 2012 que fue el año que más siniestros se registraron. Cabe recalcar el número de incendios se lo relaciona con la frecuencia del riesgo de que se produzca una ignición, así con condiciones de temperaturas altas y disminución de la precipitación, la probabilidad de riesgo aumenta y con ello también el hecho de que haya un incremento en el número de siniestros. No obstante el número de hectáreas afectadas no tiene por qué ajustarse a los valores del índice, puesto que el impacto que tenga el incendio una vez ocurrida la ignición, depende de cuán bien dotado se esté para la extinción del fuego.

Finalmente con los resultados obtenidos del FWI en la serie histórica se ajustan los valores del intervalo de confianza, calculado con anterioridad, para este índice se presenta así mismo, las desviaciones estándar y la banda de mínimos y máximos como se presenta en los siguientes gráficos.

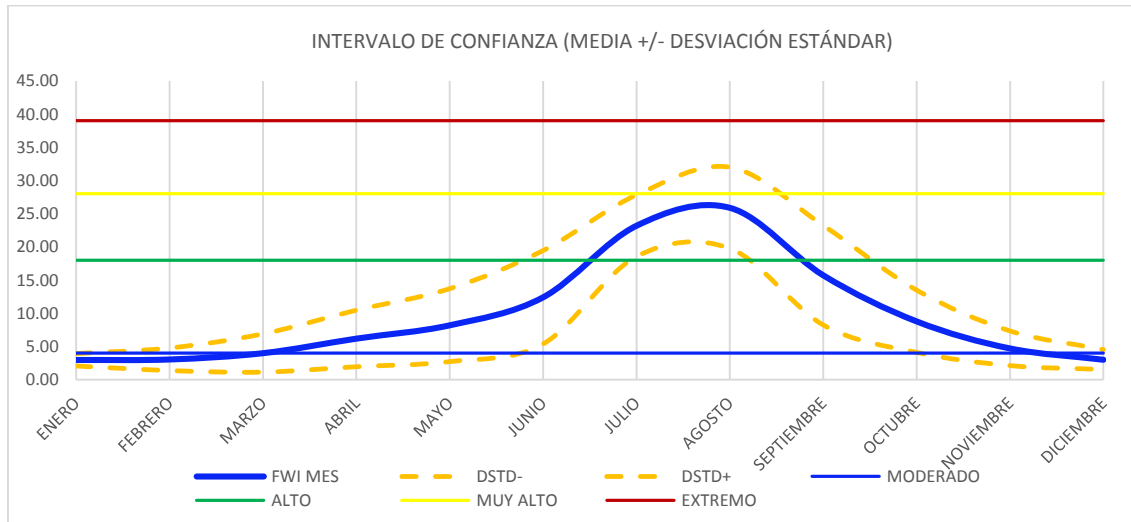


Gráfico 48. Intervalo de confianza del FWI serie histórica 1940 – 2012 – media +/- desviación estándar.

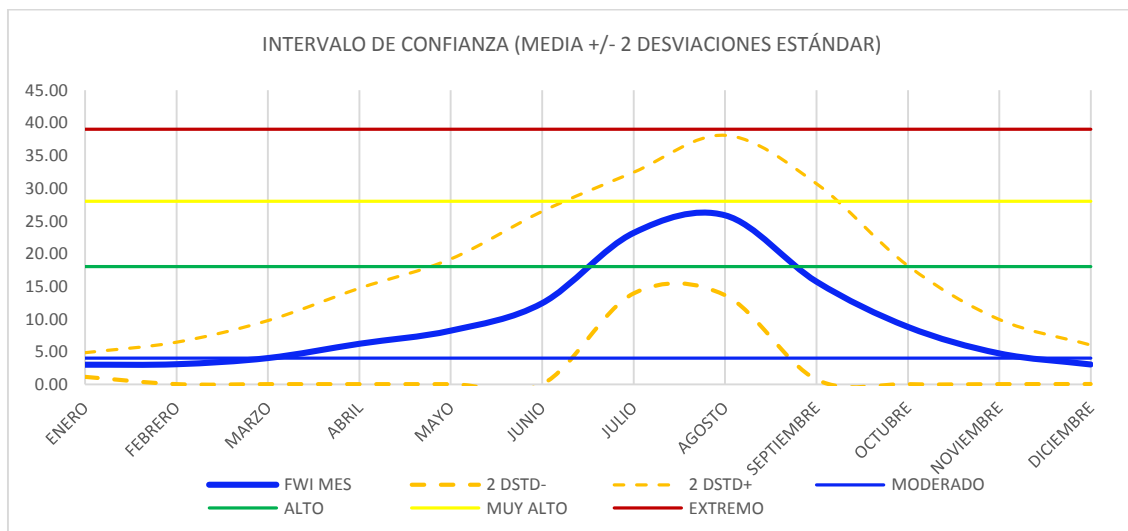


Gráfico 49. Intervalo de confianza del FWI serie histórica 1940 – 2012 – media +/- 2 desviaciones estándar.

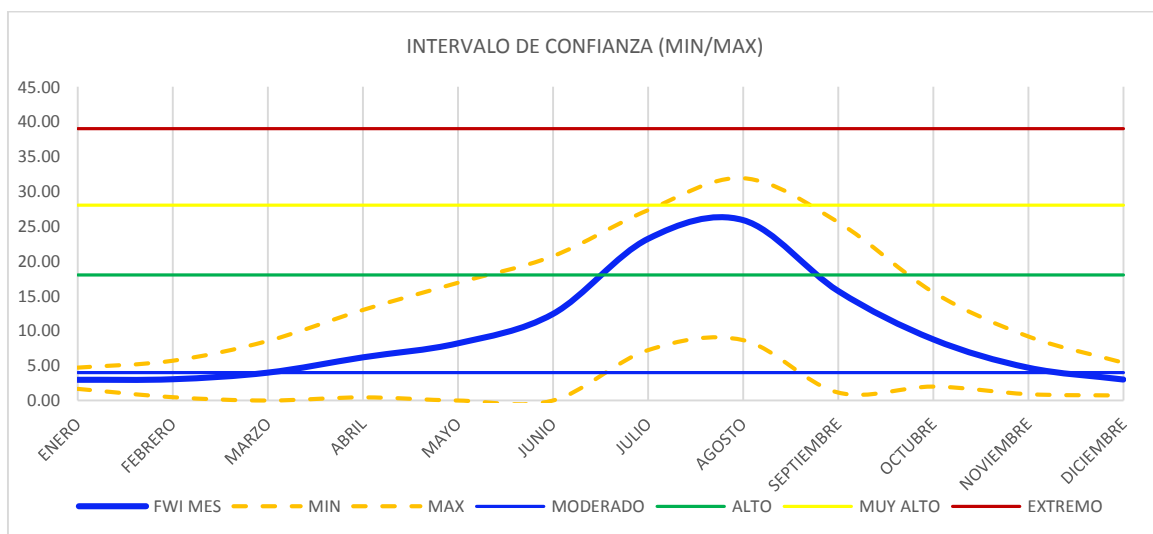


Gráfico 50. Intervalo de confianza del FWI serie histórica 1940 – 2012 – mínimos y máximos.

5.3.2 KBDI SERIE HISTÓRICA 1940 - 2012

Teniendo en cuenta las mismas condiciones de la zona de estudio, el KBDI al igual que como se presenta en la serie diaria, da resultados en la escala de riesgo, más bajos como se puede observar en el gráfico 511.

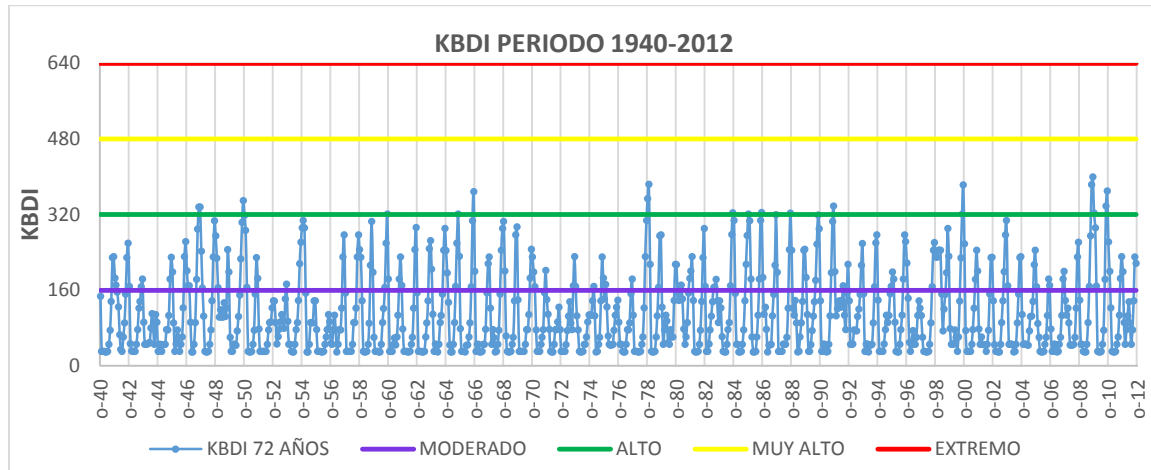


Gráfico 51. KBDI mensual (serie histórica 1940 – 2012)

Como se puede apreciar, el KBDI da resultados diferentes, debido a su escala, hay 27 meses del total evaluado, equivalente al 3%, que alcanzan la calificación ALTA de riesgo de incendio, mientras que a diferencia del FWI, la mayor parte de los meses en estudio, 70%, se mantienen en un riesgo BAJO. Otra de las cosas que llama la atención de este índice es el hecho que registra un valor máximo en noviembre de 1978, en un año donde según las estadísticas del MAGRAMA, no se tuvieron condiciones extremas en la temporada de incendios y menos aún en época invernal. Así mismo el índice registra en el verano del 1994 unas condiciones moderadas, cuando en este año fue en el que se registraron más condiciones extremas.

Evaluando los datos, para entender el comportamiento de estos meses, se apreció que para el caso de noviembre de 1978, el índice no registró lluvias considerables a partir de los meses de verano, esto conllevó, al ser acumulativo este índice, a que los valores alcanzaran el pico hasta el mes de noviembre, a partir de ahí se presentaron precipitaciones que estabilizaron el mismo.

Para el caso del mes de agosto de 1994, el índice no logró crecer lo suficiente debido a los considerables episodios de lluvia que se dieron en abril y mayo, con lo que el índice disminuyó su valor, y al ser este muy sensible al factor precipitación, no llegó a los valores extremos reales que muestran las estadísticas, como se muestra en los gráficos presentados a continuación, al igual que con el FWI, se ha realizado la comparativa de

las medias anuales del índice con las estadísticas antes mencionadas de la provincia de Cuenca.

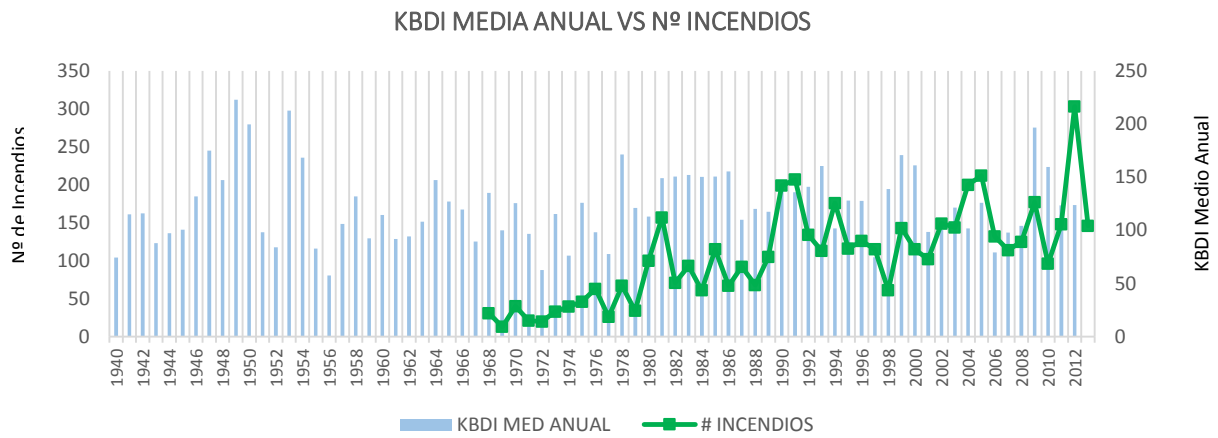


Gráfico 52. KBDI anual (serie histórica 1940 – 2012) vs. Número de incendios en la provincia de Cuenca (1968 – 2013)

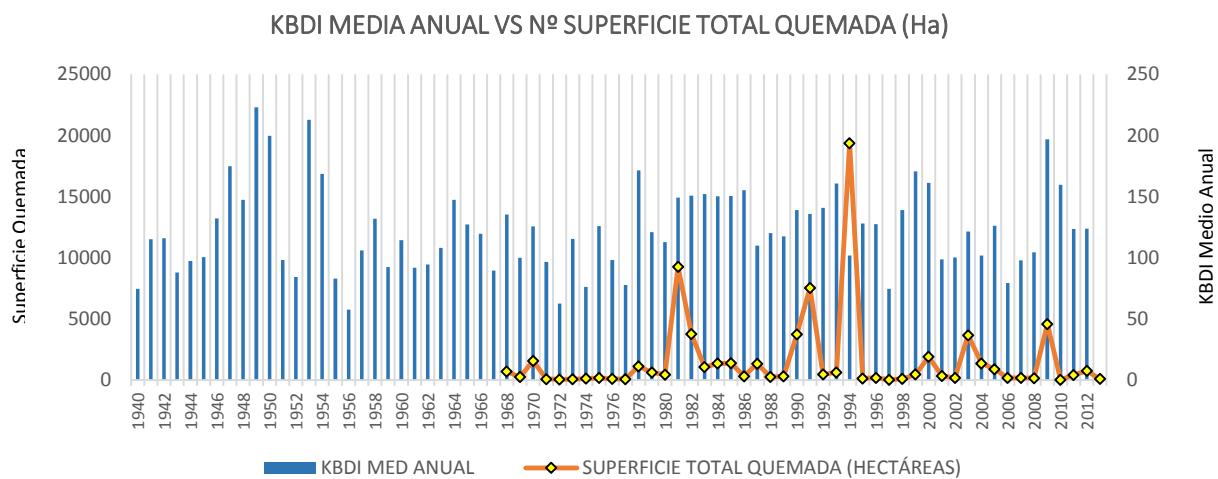


Gráfico 53. KBDI anual (serie histórica 1940 – 2012) vs. Superficie forestal total quemada en la provincia de Cuenca (1968 – 2013)

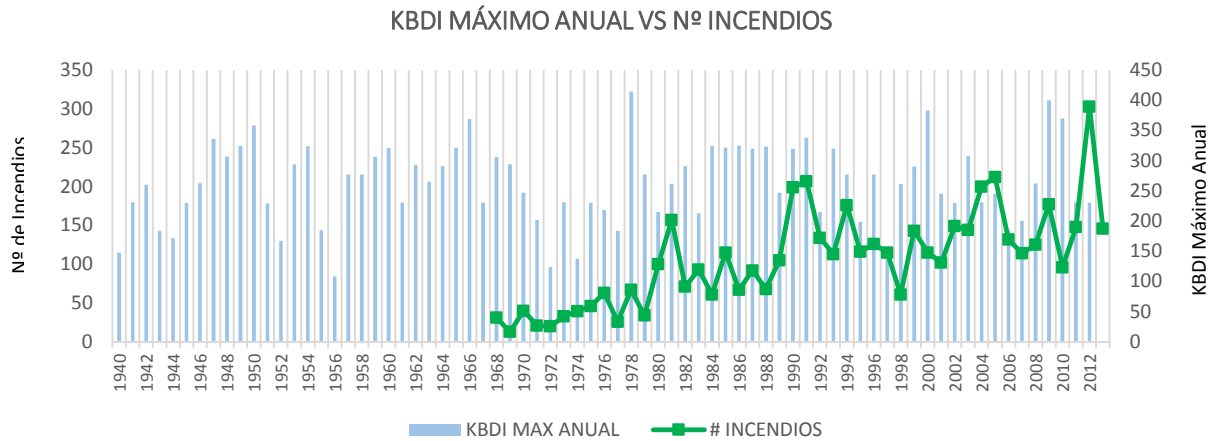


Gráfico 54. KBDI máximo anual (serie histórica 1940 – 2012) vs. Número de incendios en la provincia de cuenca (1968 – 2013)

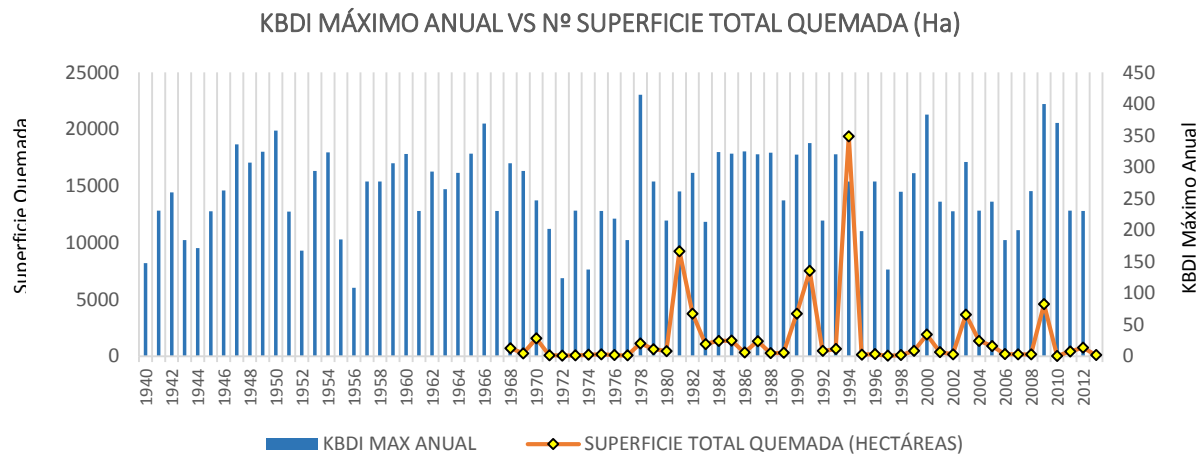


Gráfico 55. KBDI máximo anual (serie histórica 1940 – 2012) vs. Superficie forestal total quemada en la provincia de cuenca (1968 – 2013)

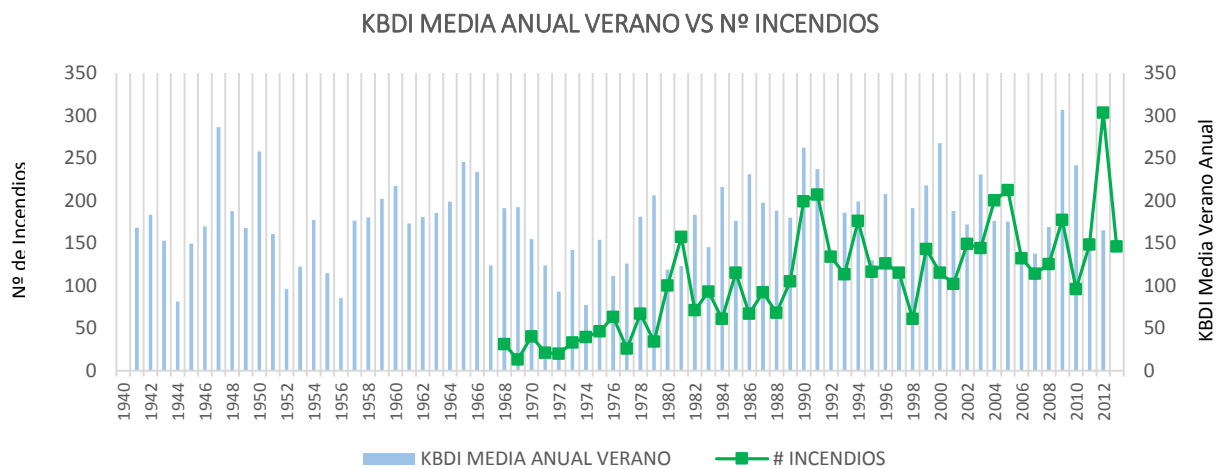


Gráfico 56. KBDI media anual verano (serie histórica 1940 – 2012) vs. Número de incendios en la provincia de cuenca (1968 – 2013)

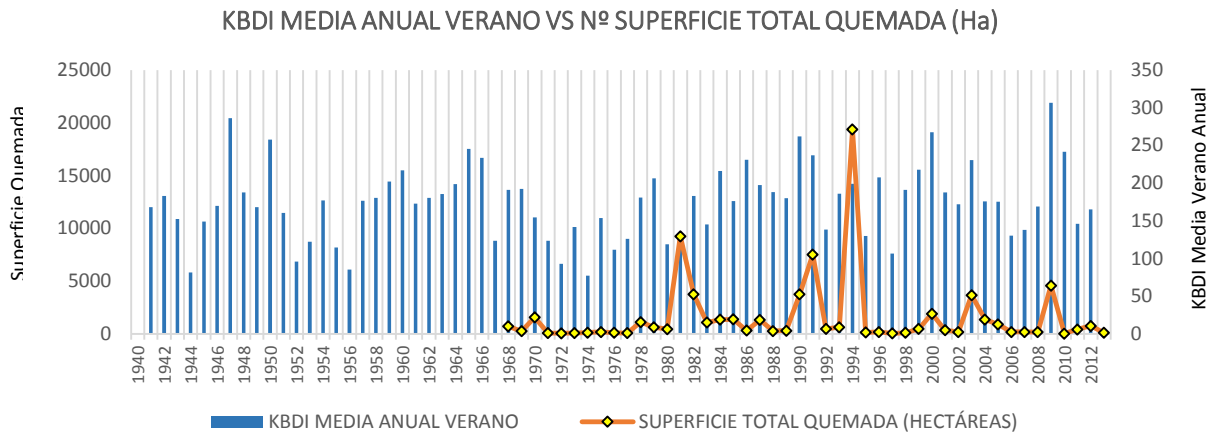


Gráfico 57. KBDI media anual verano (serie histórica 1940 – 2012) vs. Superficie forestal total quemada en la provincia de cuenca (1968 – 2013)

La comparativa que más ajusta a las estadísticas reales, es la de número de siniestros, el índice sin embargo, no registra los picos de valores extremos en los años donde se presentaron las condiciones extremas, por lo que se puede concluir que más fiabilidad a la hora de gestionar los incendios forestales en la zona en estudio, se tendrá al índice canadiense FWI.

Finalmente para el KBDI de la serie histórica calculada, se ajustan los valores de la banda del error de mínimos y máximos definida con anterioridad, y que se presentan a continuación.

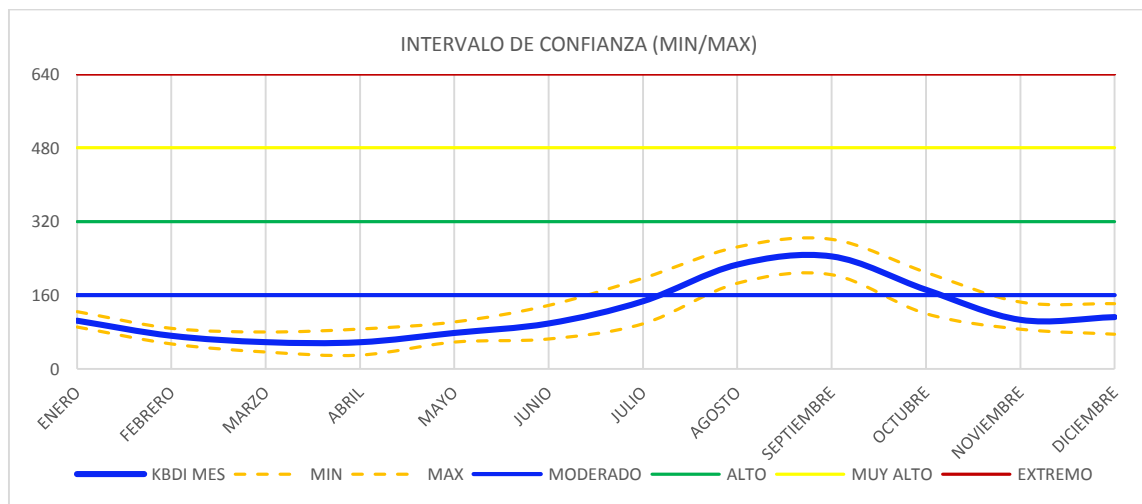


Gráfico 58. Intervalo de confianza del KBDI serie histórica 1940 – 2012 – mínimos y máximos.

5.3.3 COMPARACIÓN DEL FWI Y KBDI SERIE HISTÓRICA 1940-2012 CONTRA LOS ÚLTIMOS 32 AÑOS PERIODO 1980-2012

Antes de empezar a simular los escenarios de cambio climático, se decidió comparar toda la serie histórica mensual de 72 años contra los últimos 32 años de la misma, para así comprobar si la variación climática de estos últimos años ha tenido efecto en el aumento del riesgo de incendios. Así, en los gráficos que se presentan a continuación, muestra la comparación del FWI, junto con su intervalo de confianza del percentil 95%, así mismo el KBDI con su respectivo intervalo de confianza.

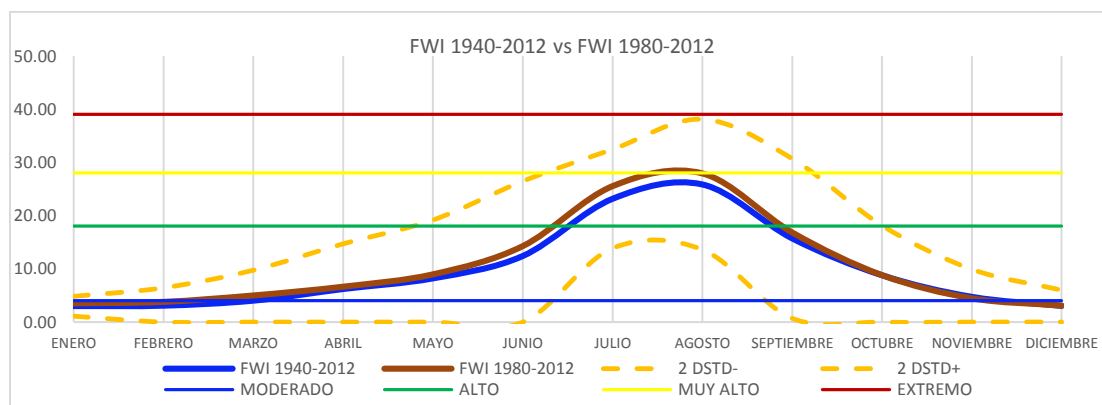


Gráfico 59. FWI serie histórica 1940 – 2012 vs FWI 1980 – 2012

Se puede apreciar un incremento en los valores del índice, más significativamente, en los meses de julio y agosto, que subieron hasta 2.38 puntos con respecto a la media de 1940-2012. Esto ha significado un aumento en las clasificaciones de riesgo en el índice, lo que conlleva a un la realización de planteamiento distinto al momento de gestionar los incendios forestales.

Para el KBDI la situación es distinta, como se aprecia en el gráfico 60, si bien existen incrementos con respecto a la media, los mismos son mínimos, por lo que no tienen tanta repercusión sobre el índice al momento de gestionar los incendios.

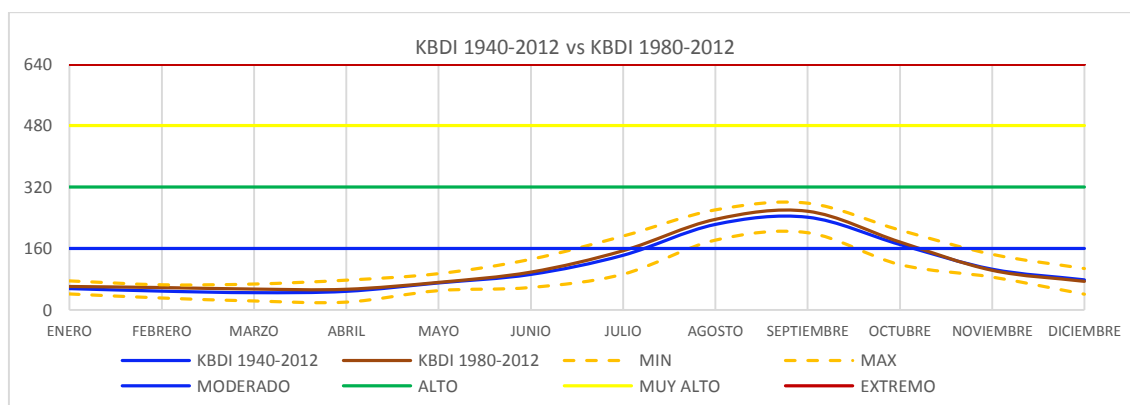


Gráfico 60. KBDI serie histórica 1940 – 2012 vs KBDI 1980 – 2012

5.4 SIMULACIÓN DE ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO

Para la simulación de los escenarios de cambio climático, se han hecho uso de dos modelos anteriormente descritos en la metodología. Los mismos nos ayudaron para obtener resultados del impacto que tendrán la variación climática en los índices tanto a corto, medio o largo plazo en cada escenario, y si los mismos tendrán repercusiones considerables en la gestión de los incendios forestales.

Las tablas que se presentan a continuación muestran las anomalías de temperatura y precipitación a corto, medio y largo plazo para los dos modelos utilizados y los escenarios que fueron modelados en los mismos, estas anomalías fueron facilitadas para el presente trabajo, las mismas que fueron comparadas con los resultados mostrados en el informe AR5 del IPCC, para comprobar la fiabilidad de las mismas antes de su uso.

CORTO PLAZO (2010-2030)							
	MPI-ESM-MR CABECERA JÚCAR			HadGEM2-ES CABECERA JÚCAR			
	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 6.0	RCP 8.5
OCT	0.629	-0.149	0.691	1.793	2.064	1.757	1.329
NOV	0.618	0.780	1.295	1.162	1.104	1.023	1.122
DIC	0.664	0.717	1.053	1.854	1.462	0.675	1.352
ENE	0.280	0.200	0.769	1.079	0.683	0.858	0.739
FEB	-0.082	1.047	0.537	0.446	0.170	0.633	0.649
MAR	-0.225	0.154	0.268	1.081	0.996	0.319	1.121
ABR	0.378	0.487	0.980	0.764	1.282	0.730	0.864
MAY	0.923	1.267	1.307	0.738	0.714	1.250	0.601
JUN	0.017	0.760	0.949	1.121	1.988	1.196	1.430
JUL	0.816	0.869	1.037	2.326	1.700	2.320	2.201
AGO	1.560	1.745	1.674	1.683	1.421	1.878	1.895
SEP	1.045	0.993	0.854	1.767	1.953	1.294	2.302
MEDIA	0.6	0.7	1.0	1.3	1.3	1.2	1.3

Tabla 22. Anomalías de Temperatura en la cabecera del Júcar. Corto Plazo (2010-2030)

MEDIO PLAZO (2040-2060)							
	MPI-ESM-MR CABECERA JÚCAR			HadGEM2-ES CABECERA JÚCAR			
	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 6.0	RCP 8.5
OCT	1.073	1.240	1.839	2.445	2.801	2.166	3.497
NOV	1.095	1.482	2.270	1.791	2.043	2.080	3.379
DIC	0.879	1.042	1.612	1.994	2.923	2.271	3.418
ENE	0.770	1.265	1.514	1.913	2.036	1.495	2.388
FEB	0.706	1.446	2.265	1.381	1.471	1.594	1.466
MAR	0.692	0.795	1.474	1.283	1.576	1.047	1.241
ABR	1.342	1.155	2.033	0.957	2.233	1.567	2.296
MAY	1.191	1.926	2.745	2.186	2.074	2.119	2.923
JUN	1.001	1.701	2.508	2.637	3.484	3.345	3.975
JUL	1.783	2.263	3.861	3.114	4.367	4.055	5.354
AGO	2.462	3.013	4.159	3.112	3.712	3.445	5.030
SEP	1.386	2.106	3.505	3.136	3.482	3.528	4.179
MEDIA	1.2	1.6	2.5	2.2	2.7	2.4	3.3

Tabla 23. Anomalías de Temperatura en la cabecera del Júcar. Medio Plazo (2040-2060)

LARGO PLAZO (2070-2090)							
	MPI-ESM-MR CABECERA JÚCAR			HadGEM2-ES CABECERA JÚCAR			
	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 6.0	RCP 8.5
OCT	0.410	2.307	4.822	3.252	3.831	5.216	7.792
NOV	0.650	2.515	4.625	2.324	2.949	3.873	5.684
DIC	0.622	1.656	4.182	2.765	2.690	3.654	5.707
ENE	0.668	1.759	2.801	1.705	2.542	3.428	4.669
FEB	1.722	1.891	3.191	0.955	2.186	2.442	4.493
MAR	0.918	1.268	3.465	0.883	1.790	3.398	5.232
ABR	0.701	1.716	3.436	1.970	2.140	3.358	5.651
MAY	0.434	2.525	4.488	0.791	2.582	4.858	6.082
JUN	0.235	2.626	5.907	2.275	4.024	5.169	8.624
JUL	1.220	3.852	8.080	3.670	5.385	6.688	9.855
AGO	1.508	4.497	8.338	2.197	4.998	6.566	9.430
SEP	0.440	3.104	6.644	3.488	4.092	6.264	8.502
MEDIA	0.8	2.5	5.0	2.2	3.3	4.6	6.8

Tabla 24. Anomalías de Temperatura en la cabecera del Júcar. Largo Plazo (2070-2090)

CORTO PLAZO (2010-2030)							
	MPI-ESM-MR CABECERA JÚCAR			HadGEM2-ES CABECERA JÚCAR			
	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 6.0	RCP 8.5
	OCT	13.78	17.70	11.18	-2.76	1.01	-14.60
NOV	1.89	-6.57	2.04	-10.74	-8.75	-3.89	-7.16
DIC	-8.02	6.21	-0.20	-0.68	-0.61	-0.87	-0.31
ENE	0.30	-6.47	8.59	4.61	0.75	1.52	5.02
FEB	10.58	4.01	4.04	6.06	5.52	2.65	1.43
MAR	4.25	-1.77	-2.28	-5.54	7.43	-4.16	-2.04
ABR	-16.85	-13.44	-26.66	-7.10	-16.83	-14.01	-13.82
MAY	-21.43	-24.40	-19.13	19.78	16.48	6.48	15.25
JUN	-2.77	0.71	-11.46	-7.40	-21.01	-6.04	-13.39
JUL	-3.41	1.55	-1.78	-4.80	-4.84	-14.61	-7.64
AGO	-5.87	-12.83	-8.45	-5.77	-3.49	-13.87	-12.67
SEP	0.12	-9.32	-13.31	-3.36	-16.28	-1.27	-9.02
MEDIA	-27.44	-44.61	-57.43	-17.71	-40.64	-62.66	-37.17

Tabla 25. Anomalías de Precipitación en la cabecera del Júcar. Corto Plazo (2010-2030)

MEDIO PLAZO (2040-2060)							
	MPI-ESM-MR CABECERA JÚCAR			HadGEM2-ES CABECERA JÚCAR			
	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 6.0	RCP 8.5
	OCT	17.93	14.85	10.82	-7.72	1.07	11.43
NOV	5.59	5.25	3.54	6.87	4.34	-7.07	-6.05
DIC	-11.27	10.40	5.92	-1.85	1.65	-13.81	-15.61
ENE	3.57	2.85	5.07	-3.87	-6.03	-2.34	3.01
FEB	18.16	7.69	0.34	11.61	9.38	-1.90	9.76
MAR	4.20	-4.51	-4.92	-5.94	4.07	-4.92	6.16
ABR	-22.87	-18.39	-27.89	-12.35	-8.19	-16.93	-11.47
MAY	-22.43	-23.55	-24.84	14.17	20.73	-2.11	3.47
JUN	-9.96	-16.11	-10.61	-10.30	-31.28	-27.05	-25.71
JUL	-7.39	-10.17	-7.47	-8.01	-18.65	-20.04	-15.32
AGO	-9.76	-9.34	-12.91	-14.49	-16.51	-19.04	-23.36
SEP	-12.48	-13.61	-5.72	-6.00	-2.99	11.33	-6.65
MEDIA	-46.72	-54.65	-68.67	-37.89	-42.42	-92.47	-81.67

Tabla 26. Anomalías de Precipitación en la cabecera del Júcar. Medio Plazo (2040-2060)



LARGO PLAZO (2070-2090)							
	MPI-ESM-MR CABECERA JÚCAR			HadGEM2-ES CABECERA JÚCAR			
	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 6.0	RCP 8.5
OCT	8.37	5.67	3.18	0.89	-7.02	-2.06	-5.77
NOV	2.02	-8.27	-6.25	0.47	-2.58	-4.42	-14.78
DIC	5.75	-1.06	-3.48	-6.32	-4.68	-7.16	-13.63
ENE	1.76	-2.96	7.34	-7.58	-4.04	-2.07	-6.36
FEB	17.47	7.07	7.38	12.77	1.48	10.21	1.79
MAR	-4.81	2.47	-0.03	4.68	3.38	-12.10	-9.46
ABR	-8.81	-30.98	-30.04	-4.50	-12.83	-22.08	-33.52
MAY	-21.22	-28.11	-27.42	19.12	9.29	-0.64	8.66
JUN	2.86	-13.14	-24.85	-9.48	-38.49	-20.25	-45.07
JUL	-1.19	-9.35	-16.11	-14.36	-20.78	-21.70	-28.88
AGO	-1.44	-3.94	-12.84	-4.43	-23.56	-26.98	-38.45
SEP	-6.43	-9.84	-18.59	-17.66	13.35	-25.07	-22.56
MEDIA	-5.69	-92.44	-121.70	-26.41	-86.49	-134.32	-208.02

Tabla 27. Anomalías de Precipitación en la cabecera del Júcar. Largo Plazo (2070-2090)

5.4.1 FWI. MODELO HadGEM2-ES

El primer análisis se lo realiza de acuerdo al escenario RCP 2.6, que consiste en variaciones climáticas bajas, y que identifican un forzamiento radiativo de 2.6W/m², con una tendencia decreciente en el 2100 y con emisiones de CO₂ de 421 ppm.

Este escenario, tuvo un incremento en el número de meses que alcanzaron el riesgo ALTO de incendio, así, de un 6% que la serie histórica registra en sus resultados, se elevó a un 9% de todos los meses en estudio, que es la variación más considerable para este escenario.

Las evaluaciones restantes realizadas para los escenarios RCP 4.5, 6.0 y 8.5 consisten en variaciones climáticas medias, altas y muy altas, y que se identifican con un forzamiento radiativo de 4.5, 6.0 y 8.5W/m² respectivamente, con una tendencia estable en el 2100 para la primera y creciente para las dos últimas, con emisiones de CO₂ de 538 a 936 ppm.

Estos tres escenarios tuvieron una variación similar en el índice, debido a que su incremento porcentual para los valores picos fueron del 6% al 11%, lo que se evidencia un incremento de casi el 50% del total de meses que superan la calificación ALTA de riesgo.

Para un mejor entendimiento de las variaciones para los diferentes escenarios se calcularon medias de todos los meses en estudio, así el gráfico 61 presenta la comparativa tanto del FWI de la serie histórica junto con los escenarios anteriormente descrito a corto plazo.

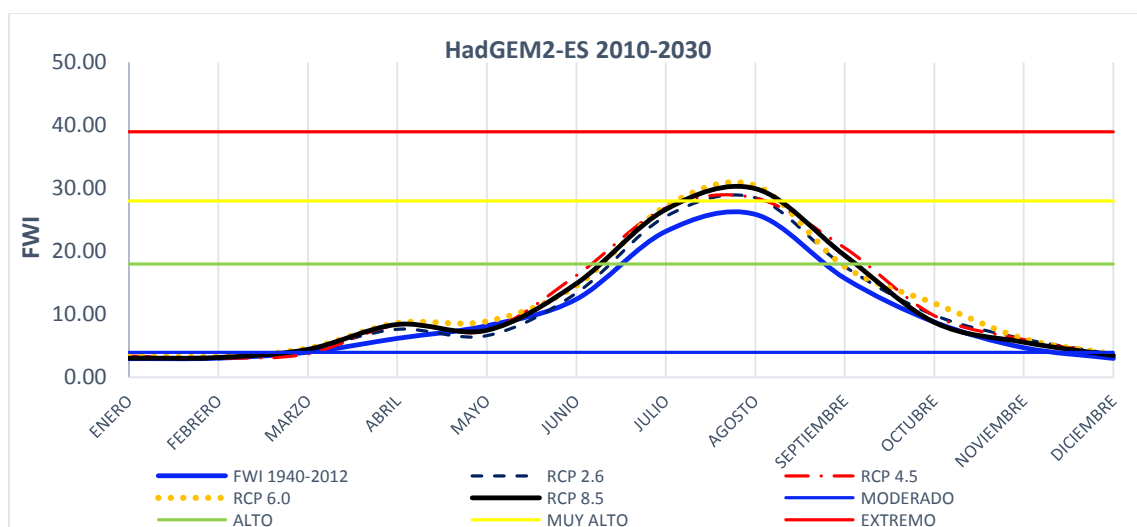


Gráfico 61. Comparativa del FWI de la serie histórica con los escenarios del modelo HadGEM2-ES a corto plazo (2010 – 2030).

VARIACIONES DEL ÍNDICE EN VERANO				
	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 6.0	RCP 8.5
JULIO	2.40	3.75	3.99	3.51
AGOSTO	2.67	2.63	4.60	4.12
SEPTIEMBRE	1.89	4.87	1.86	3.64

Tabla 28. Variaciones del FWI en verano con los escenarios del modelo HadGEM2-ES a corto plazo (2010 – 2030)

Como se detalla en la tabla 28, los meses de verano presentaron incrementos de hasta 5 puntos en valores absolutos del índice, siendo julio y agosto los que más cambios experimentaron, elevando la calificación del riesgo de incendio.

Para el periodo a medio plazo, los escenarios tienen una tendencia más elevada de incremento, reflejándose así en el porcentaje del total de meses que llegaron hasta el riesgo alto de incendios para el primer escenario, RCP 2.6, del 9% se incrementó hasta 11%, y para el resto de escenarios de 13% hasta 16%, inclusive escenarios como el 6.0 los meses que llegaron a alcanzar la clasificación MODERADA, fueron 436, equivalente a un 50% del total de meses, es decir la mitad de la serie histórica para este periodo se ubica ya, con un riesgo considerable de incendio.

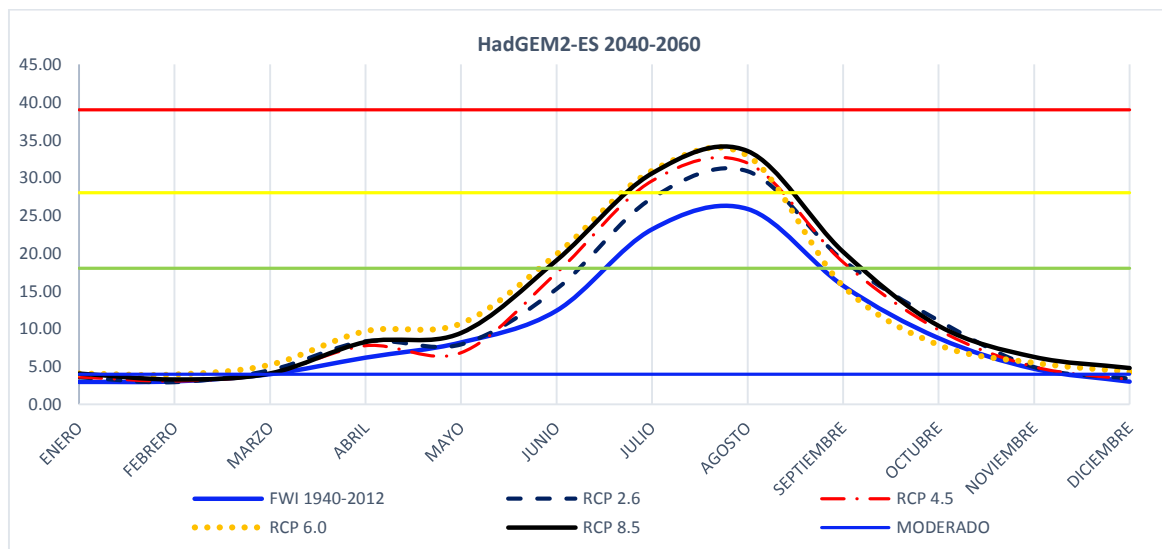


Gráfico 62. Comparativa del FWI de la serie histórica con los escenarios del modelo HadGEM2-ES a medio plazo (2040 – 2060).

En el gráfico 62, se aprecia con claridad el ensanchamiento de la media en los meses de verano, este incremento llega a sus valores más altos esta vez, en todo el mes de julio hasta mediados de agosto que el índice ya comienza a descender. Como se puede ver en la tabla 29, los meses que más incrementos en valores absolutos del índice fueron julio y agosto.

VARIACIONES DEL ÍNDICE EN VERANO				
	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 6.0	RCP 8.5
JULIO	4.14	6.43	7.75	7.41
AGOSTO	5.01	6.10	7.04	7.66
SEPTIEMBRE	3.38	3.13	-0.07	4.48

Tabla 29. Variaciones del FWI en verano con los escenarios del modelo HadGEM2-ES a medio plazo (2040 – 2060)

Finalmente en el periodo de largo plazo del modelo, los resultados presentaron una variación más amplia en cuanto a los valores de riesgo de incendio, siendo el escenario RCP 8.5, el más crítico y con una diferencia bastante considerable en comparación al resto, el siguiente gráfico muestra la comparativa de los modelos.

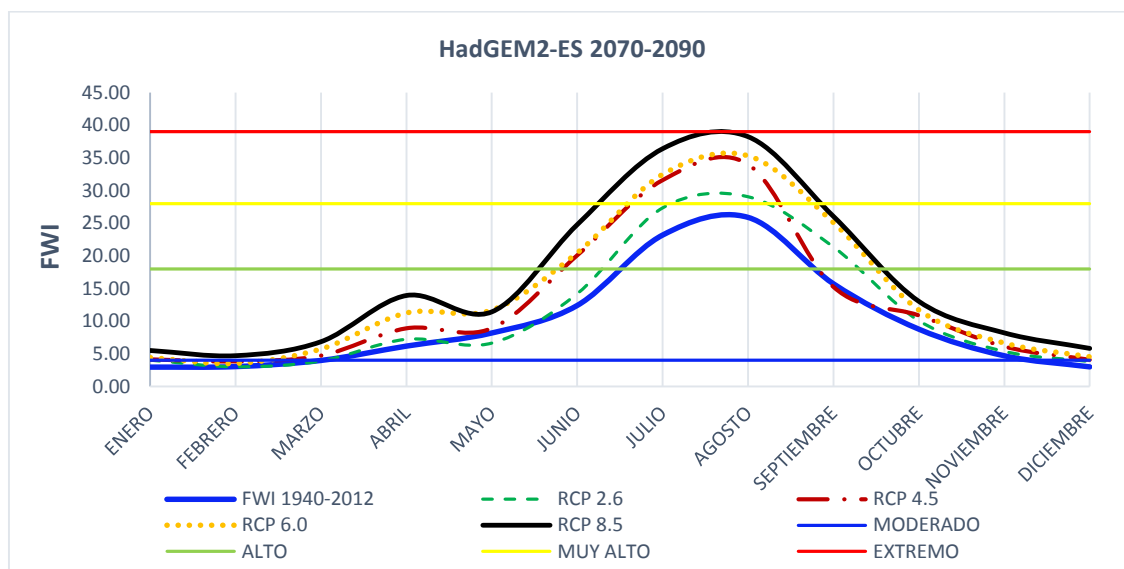


Gráfico 63. Comparativa del FWI de la serie histórica con los escenarios del modelo HadGEM2-ES a largo plazo (2070 – 2090).

VARIACIONES DEL ÍNDICE EN VERANO				
	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 6.0	RCP 8.5
JULIO	4.16	8.41	9.31	13.23
AGOSTO	3.19	8.12	9.44	12.37
SEPTIEMBRE	5.66	-0.48	9.38	10.32

Tabla 30. Variaciones del FWI en verano con los escenarios del modelo HadGEM2-ES a largo plazo (2070 – 2090)

Como se aprecia en el gráfico 63, el escenario 8.5 alcanza valores con calificaciones EXTREMAS en el mes de Julio, en la media, pero en valores mensuales por año, son 51 meses, mayoritariamente Agosto y Julio, que alcanzan la alerta EXTREMA en este escenario, esto equivalente a un 6% de todos los meses en estudio. Es así como se ha concluido que la máxima afectación para los incendios forestales, se presentan en el peor escenario y para el periodo más prolongado.

5.4.2 FWI. MODELO MPI-ESM-MR

Para este segundo modelo, las variaciones dentro de los escenarios fueron muy similares a los resultados que obtuvo el HadGEM2-ES. A diferencia del anterior modelo, en este solo se obtuvieron datos para modelar en 3 escenarios RCP 2.6, 4.5 y 8.5.

Los resultados se presentan a continuación en los gráficos 64, 65 y 66.

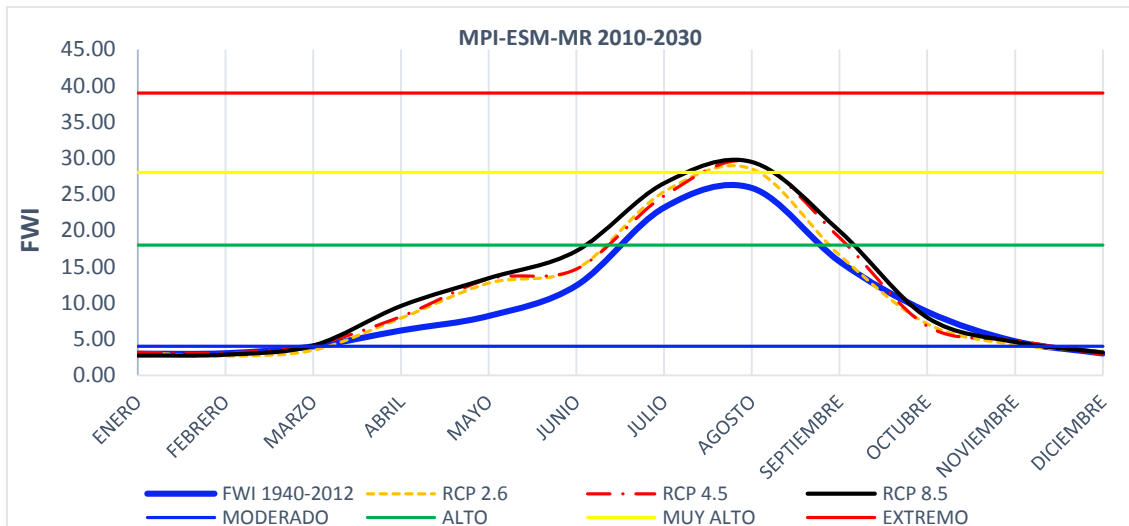


Gráfico 64. Comparativa del FWI de la serie histórica con los escenarios del modelo MPI-ESM-MR a corto plazo (2010 – 2030).

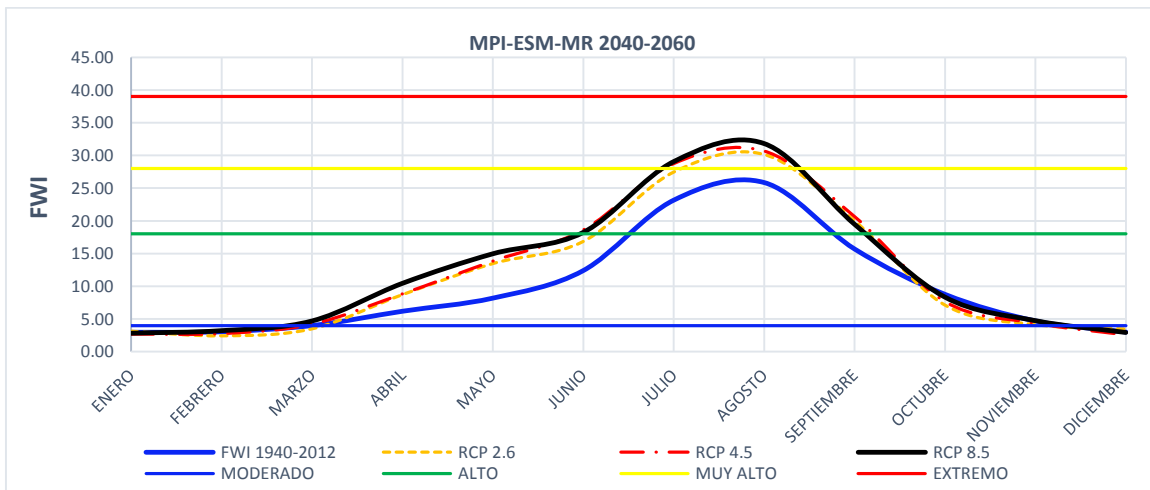


Gráfico 65. Comparativa del FWI de la serie histórica con los escenarios del modelo MPI-ESM-MR a medio plazo (2040 – 2060).

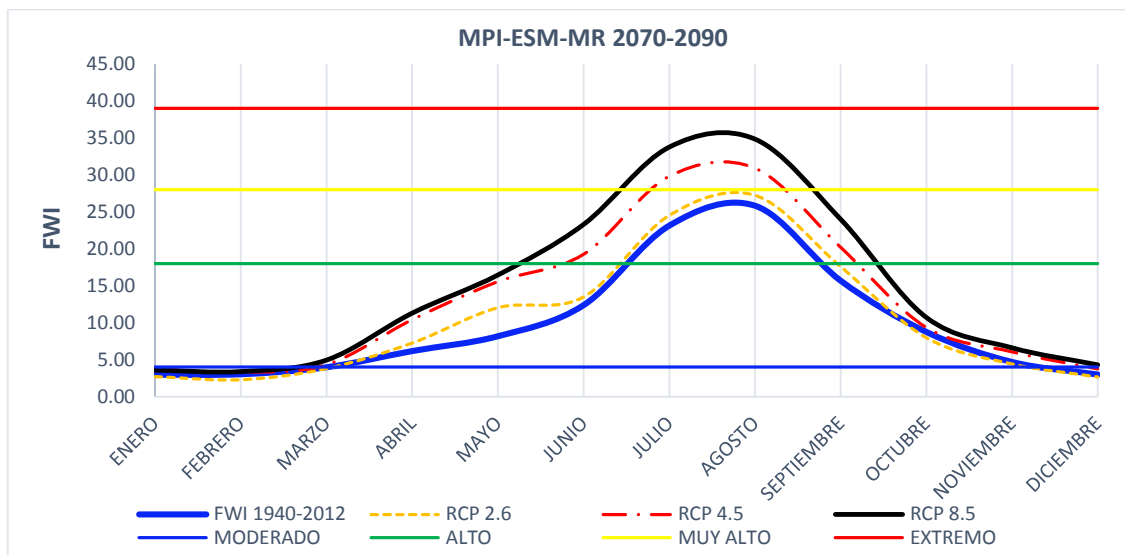


Gráfico 66. Comparativa del FWI de la serie histórica con los escenarios del modelo MPI-ESM-MR a largo plazo (2070 – 2090).

La mayor diferencia que presenta este modelo, se da en el escenario RCP 8.5 del periodo a largo plazo, en él se registran riesgos EXTREMOS en los meses de verano, 12, es decir, el 1% de todos los meses. Aun así, la diferencia que tiene este escenario con relación a la media es alta, inclusive desde mediados del mes de abril, antes de la iniciación de la temporada de incendios.

A continuación se presentan las tablas para los diferentes escenarios, de las variaciones en los meses de verano, al igual que el anterior modelos, agosto y julio son los que presentan más diferencias, pero esta vez por muy poco con relación a septiembre, mes en el que descienden los valores del índice.

VARIACIONES DEL ÍNDICE EN VERANO			
	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 8.5
JULIO	2.18	1.61	3.35
AGOSTO	2.62	3.61	3.59
SEPTIEMBRE	0.87	3.27	4.20

Tabla 31. Variaciones del FWI en verano con los escenarios del modelo MPI-ESM-MR a corto plazo (2010 – 2030)

VARIACIONES DEL ÍNDICE EN VERANO			
	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 8.5
JULIO	4.29	5.57	5.90
AGOSTO	4.28	4.80	5.96
SEPTIEMBRE	4.29	4.93	3.78

Tabla 32. Variaciones del FWI en verano con los escenarios del modelo MPI-ESM-MR a medio plazo (2040 – 2060)



VARIACIONES DEL ÍNDICE EN VERANO			
	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 8.5
JULIO	1.37	6.65	10.61
AGOSTO	1.41	5.07	8.99
SEPTIEMBRE	1.92	4.52	8.30

Tabla 33. Variaciones del FWI en verano con los escenarios del modelo MPI-ESM-MR a largo plazo (2070 – 2090)

5.4.3 KBDI. MODELO HadGEM2-ES

Para el KBDI el modelo HadGEM2-ES en corto plazo, evoluciona con una tendencia a incrementar, considerable, ya que los 4 escenarios utilizados en este modelo para el índice presentaron incrementos similares, por lo que se puede apreciar en el gráfico 67, siendo para los meses finales de verano el periodo con más incremento, cambiado inclusive, la calificación de riesgo.

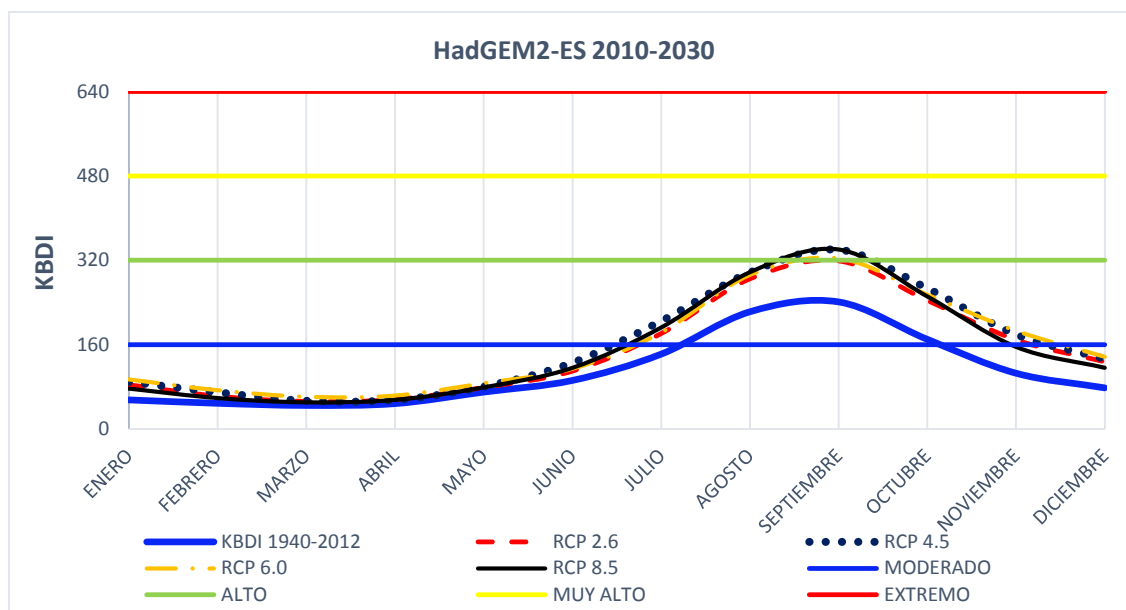


Gráfico 67. Comparativa del KBDI de la serie histórica con los escenarios del modelo HadGEM2-ES a corto plazo (2010 – 2030).

Este índice a diferencia del FWI, tiene sus mayores valores en los meses de agosto y septiembre, y esta tendencia la emula igual, cada uno de los escenarios, así, la siguiente tabla especifica los valores que incrementaron en los meses de verano, corroborando que el mes que presentó mayor incremento fue septiembre.

VARIACIONES DEL ÍNDICE EN VERANO				
	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 6.0	RCP 8.5
JULIO	39	63	41	50
AGOSTO	63	75	70	75
SEPTIEMBRE	78	99	83	99

Tabla 34. Variaciones del KBDI en verano con los escenarios del modelo HadGEM2-ES a corto plazo (2010 – 2030)

Con estos incrementos el índice, aparentemente mínimos, el índice creció del 2% de meses que alcanzaban el riesgo ALTO, hasta un 16% del total de meses, equivalente a 140 meses, para el escenario RCP 4.5.

En todos los escenarios hubo meses en los que se llegó a riesgo MUY ALTO (2+), siendo el escenario RCP 6.0, quien presenta el 1% de los meses en esta calificación.

Para el periodo a medio plazo vemos que las diferencias de las curvas son más asentadas para cada escenario, juntándose solo desde los meses de febrero hasta junio, que se elevan las temperaturas, hasta llegar a su pico en septiembre. Pero lo más notorio es que la diferencia entre el escenario más crítico, RCP 8.5, y la media de los datos históricos, se mantienen inclusive hasta en el mes de diciembre, estrechándose recién a comienzos de año.

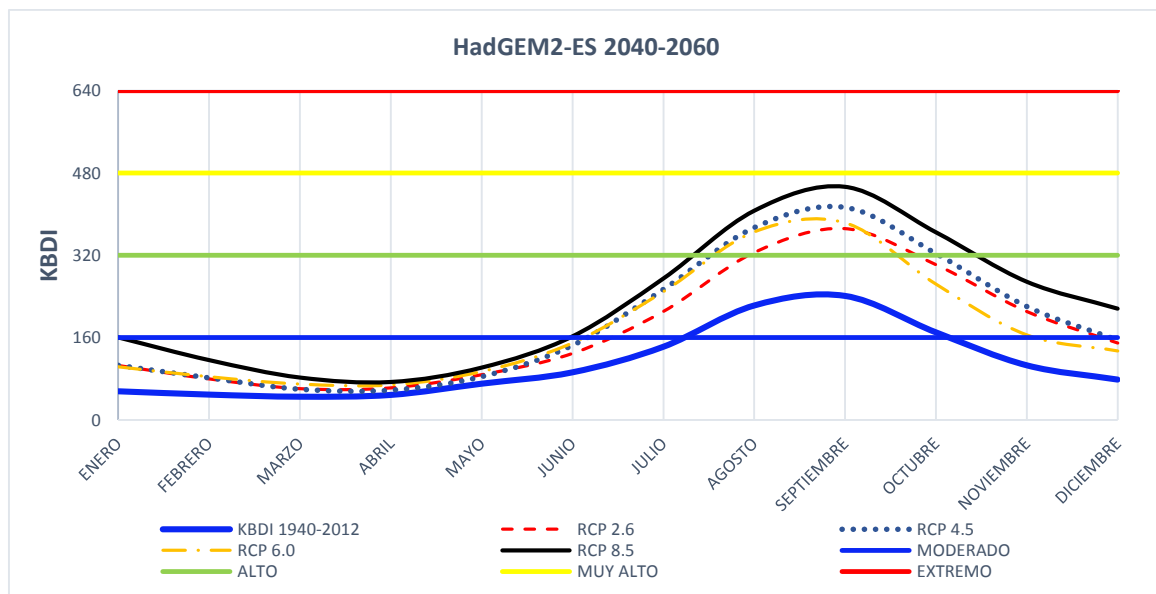


Gráfico 68. Comparativa del KBDI de la serie histórica con los escenarios del modelo HadGEM2-ES a medio plazo (2040 – 2060).

La variabilidad de cada escenario es muy notoria, como aprecia en el gráfico 68, y el único que marca una diferencia es el RCP 8.5, puesto que para este escenario el incremento de los meses que llegaron al riesgo MUY ALTO, fue de 7%, con respecto a la serie histórica.

Así, los meses de verano vemos que inclusive crece el índice 212 puntos, como muestra la tabla 35, y teniendo en cuenta que cada clasificación está dividida en 160 puntos, lo que nos muestra un incremento bastante considerable para los episodios más extremos.

VARIACIONES DEL ÍNDICE EN VERANO				
	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 6.0	RCP 8.5
JULIO	69	112	107	133
AGOSTO	103	151	143	184
SEPTIEMBRE	131	172	142	212

Tabla 35. Variaciones del KBDI en verano con los escenarios del modelo HadGEM2-ES a medio plazo (2040 – 2060)

Terminando con este modelo, para la evaluación a largo plazo, y como era de esperarse, el índice creció hasta alcanzar valores extremos, tal como lo hizo el FWI.

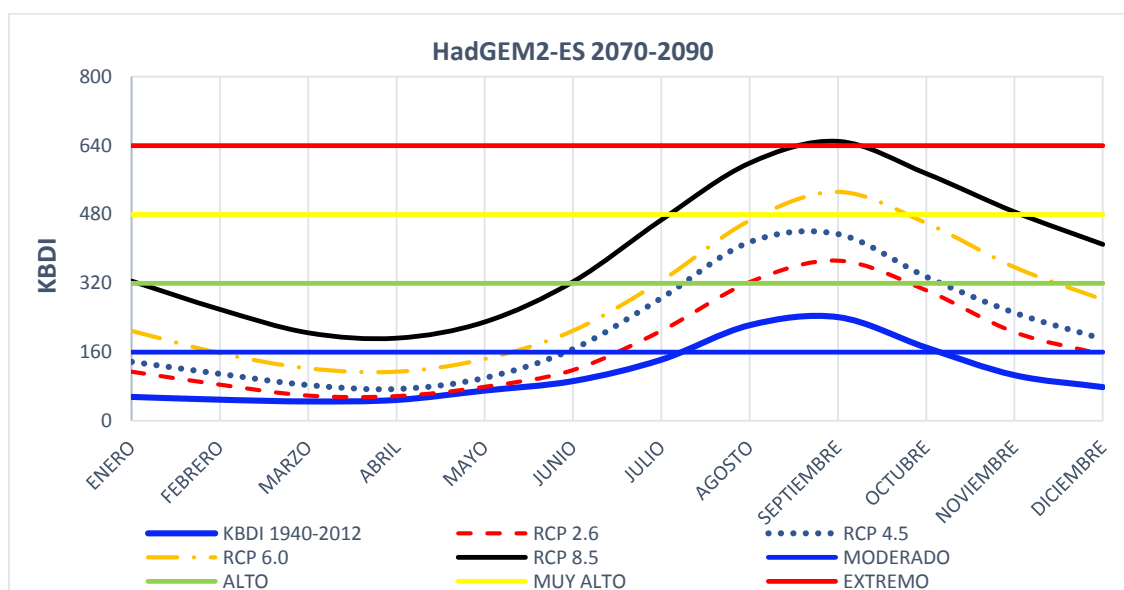


Gráfico 69. Comparativa del KBDI de la serie histórica con los escenarios del modelo HadGEM2-ES a largo plazo (2070 – 2090).

Como se puede ver en el gráfico 69, el escenario RCP 8.5, es el que alcanza los valores más altos dentro del modelo a largo plazo. Solo el primer escenario no alcanza valores extremos para toda la serie histórica modelada, sin embargo en el último, son 147 meses de un total de 864 de la serie completa, equivalente al 17%, quienes estarían en riesgo EXTREMO, si se presentaran las condiciones del RCP 8.5.

VARIACIONES PORCENTUALES EN VERANO				
	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 6.0	RCP 8.5
JULIO	67	143	183	325
AGOSTO	100	193	243	377
SEPTIEMBRE	131	193	291	409

Tabla 36. Variaciones del KBDI en verano con los escenarios del modelo HadGEM2-ES a largo plazo (2070 – 2090)



La tabla 36, corrobora los cambios extremos que tiene el índice para este periodo modelado, llegando a incrementar valores de hasta 422 puntos en el índice que suben 2 calificaciones de riesgo.

Como conclusión de la evolución de este modelo, se puede anotar que en ambos índices tiene un avance similar, salvo el caso de las tendencias en los meses de veranos que son diferentes, pero el resultado es el mismo, un cambio climático a largo plazo modificará de forma crítica los valores de riesgo.

5.4.4 KBDI. MODELO MPI-ESM-MR

En este segundo modelo, al igual que como pasa en el FWI, las variaciones dentro de los escenarios fueron muy similares a los resultados que se obtuvo con el HadGEM2-ES. Así mismo, los escenarios a modelar fueron 3: RCP 2.6, 4.5 y 8.5. A continuación se muestran los gráficos con los resultados para los tres plazos: corto, medio y largo.

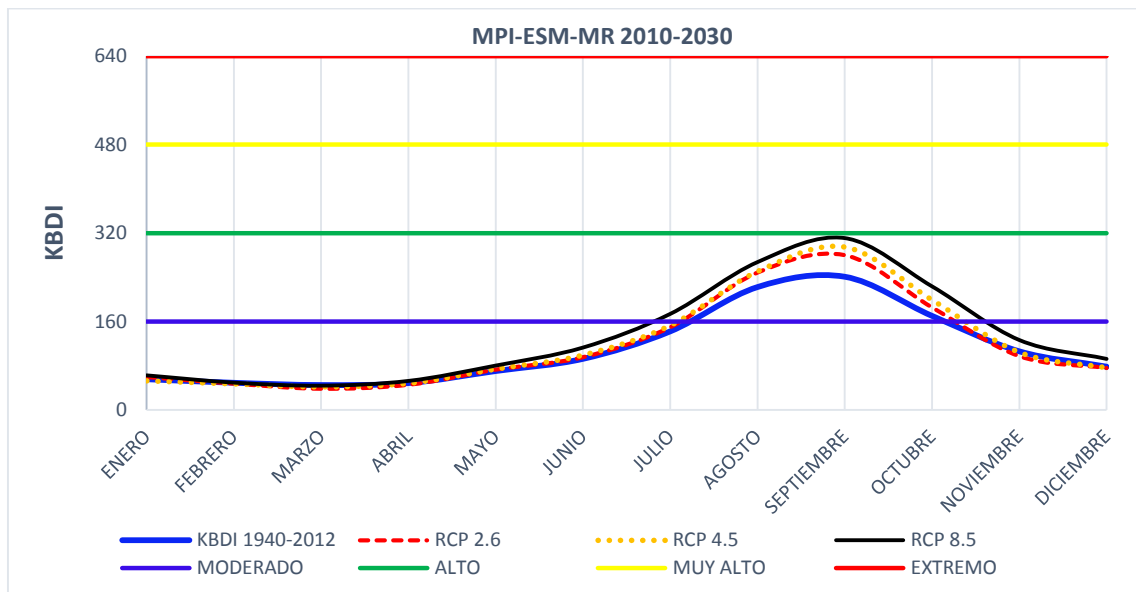


Gráfico 70. Comparativa del KBDI de la serie histórica con los escenarios del modelo MPI-ESM-MR a corto plazo (2010 – 2030).

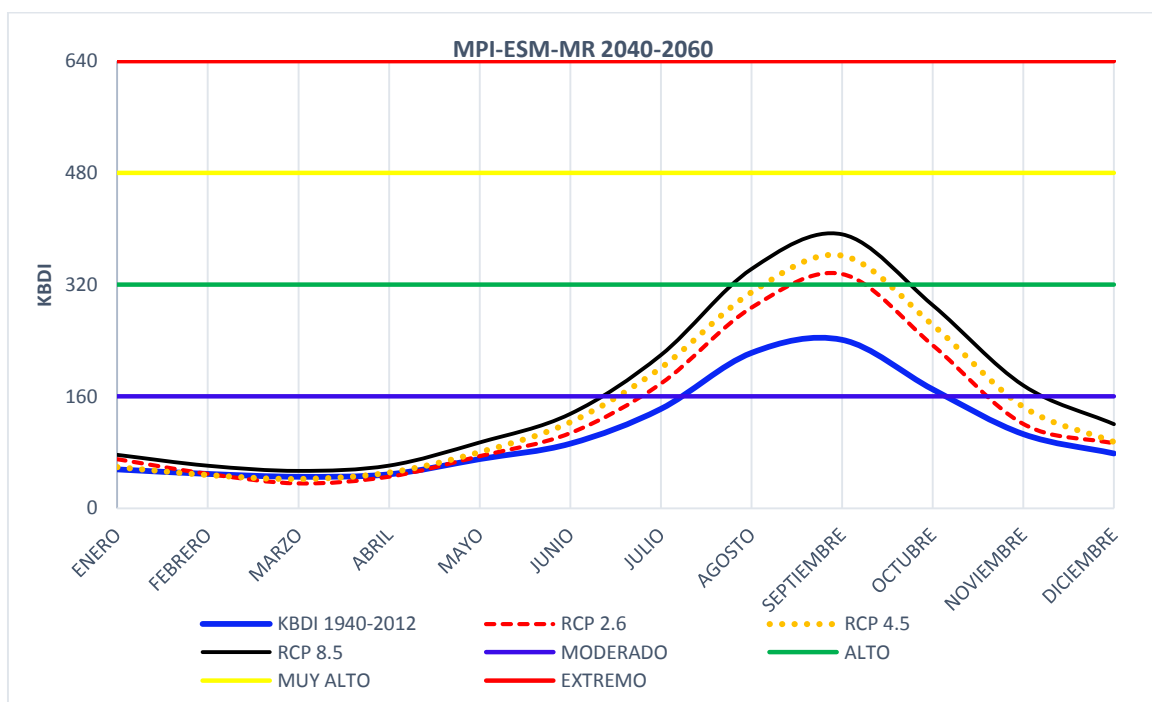


Gráfico 71. Comparativa del KBDI de la serie histórica con los escenarios del modelo MPI-ESM-MR a medio plazo (2040 – 2060).

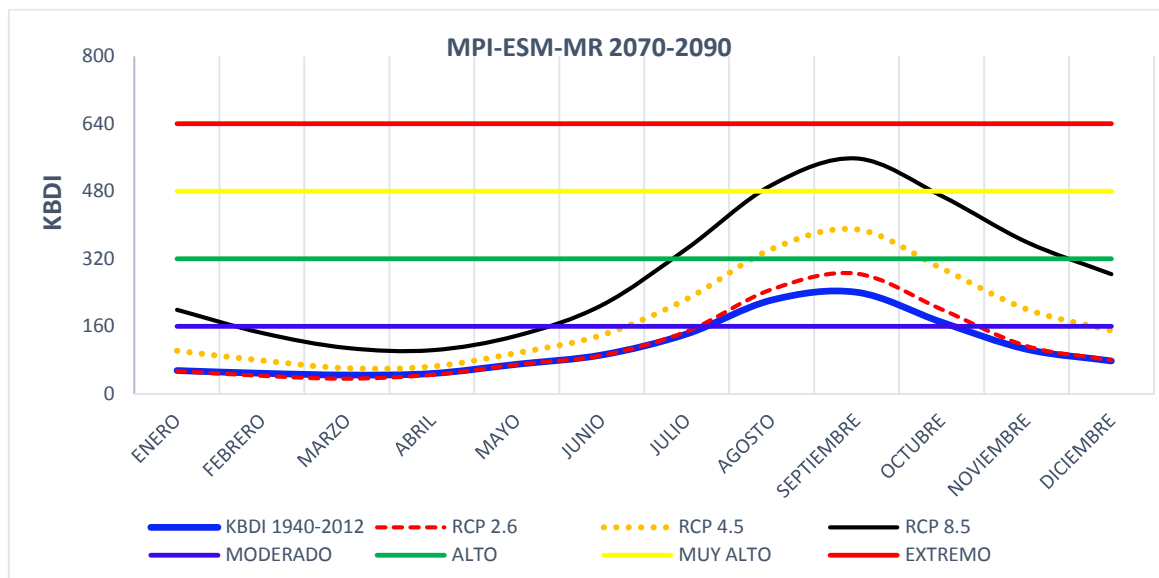


Gráfico 72. Comparativa del KBDI de la serie histórica con los escenarios del modelo MPI-ESM-MR a largo plazo (2070 – 2090).

La diferencia en este modelo, fue el incremento que tuvo el mismo en los valores de los meses de verano, mientras que para el periodo corto la diferencia con respecto a la media de la serie histórica fue muy poca, para el plazo medio recién se notan variaciones considerables, teniendo que recién para el escenario RCP 8.5, alcanzan valores MUY ALTOS de la calificación en el 2% de los meses, a diferencia que en el otro modelo que en este periodo, todos los escenarios habían alcanzado esa calificación.

Para el periodo largo, se aprecia más variabilidad con respecto al escenario anterior, ya que en este, el escenario 2.6 no varía mucho a lo largo del año con respecto a la media de la serie histórica, solo en los meses de agosto hasta octubre, un pequeño incremento. Pero al igual que en el HadGEM2-ES, es en este plazo que el índice alcanza el riesgo EXTREMO, para este modelo son menos los meses, 2% del total en estudio, los que sobrepasan dicha calificación. Las tablas que se presentan a continuación, son los valores del índice que incrementan en los meses de verano.

VARIACIONES DEL ÍNDICE EN VERANO			
	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 8.5
JULIO	8	11	32
AGOSTO	27	29	45
SEPTIEMBRE	39	54	70

Tabla 37. Variaciones del KBDI en verano con los escenarios del MPI-ESM-MR a corto plazo (2010 – 2030)



VARIACIONES DEL ÍNDICE EN VERANO			
	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 8.5
JULIO	37	59	77
AGOSTO	65	87	120
SEPTIEMBRE	94	121	151

Tabla 38. Variaciones del KBDI en verano con los escenarios del MPI-ESM-MR a medio plazo (2040 – 2060)

VARIACIONES DEL ÍNDICE EN VERANO			
	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 8.5
JULIO	6	83	202
AGOSTO	26	121	273
SEPTIEMBRE	44	149	317

Tabla 39. Variaciones del KBDI en verano con los escenarios del MPI-ESM-MR a largo plazo (2070 – 2090)

Finalmente se puede concluir que a pesar de que los dos modelos muestren valores semejantes, es el HadGEM2-ES quién presenta las situaciones más críticas de variaciones climáticas a largo plazo, que para efectos de gestionar y elaborar planes de prevención, es más recomendable irse por el peor escenario para limitar el margen de error que puedan tener los mismos.

5.4.5 SÍNTESIS DE RESULTADOS

Las tablas 40 y 41, presentan una síntesis de cada uno de los valores de los índices para los meses de verano, según el modelo y escenario aplicado.

FWI (CANADÁ) - (T, P, HR, Vv)									
MODELO - HadGEM2-ES									
ESCENARIOS	CORTO PLAZO (2010-2030)			MEDIO PLAZO (2040-2060)			LARGO PLAZO (2070-2090)		
	JUL	AGO	SEP	JUL	AGO	SEP	JUL	AGO	SEP
RCP 2.6	2.4	2.67	1.89	4.14	5.01	3.38	4.16	3.19	5.66
RCP 4.5	3.75	2.63	4.87	6.43	6.1	3.13	8.41	8.12	-0.48
RCP 6.0	3.99	4.6	1.86	7.75	7.04	-0.07	9.31	9.44	9.38
RCP 8.5	3.51	4.12	3.64	7.41	7.66	4.48	13.23	12.37	10.32
MODELO - MPI-ESM-MR									
RCP 2.6	2.18	2.62	0.87	4.29	4.28	4.29	1.37	1.41	1.92
RCP 4.5	1.61	3.61	3.27	5.57	4.8	4.93	6.65	5.07	4.52
RCP 8.5	3.35	3.59	4.2	5.9	5.96	3.78	10.61	8.99	8.3

Tabla 40. Variaciones del FWI en verano para cada modelo, escenario y plazo modelado.

Para el FWI, los incrementos más significativos se dan en los meses de Julio, a largo plazo como vemos y para el escenario más grave, el aumento de 13 puntos en el índice significaría un incremento de la calificación de riesgo, tomando en cuenta que los valores de la media de este índice se ubican finalizando el riesgo ALTO para los meses de verano, y que 10 puntos de aumento significa un cambio en la calificación. Dicho incremento de 13 puntos, ubicaría valores en riesgo EXTREMO para los dos primeros meses de verano.

KBDI (E.E.U.U.) - (T, P)									
MODELO - HadGEM2-ES									
ESCENARIOS	CORTO PLAZO (2010-2030)			MEDIO PLAZO (2040-2060)			LARGO PLAZO (2070-2090)		
	JUL	AGO	SEP	JUL	AGO	SEP	JUL	AGO	SEP
RCP 2.6	39	63	78	69	103	131	67	100	131
RCP 4.5	63	75	99	112	151	172	143	193	193
RCP 6.0	41	70	83	107	143	142	183	243	291
RCP 8.5	50	75	99	133	184	212	325	377	409
MODELO - MPI-ESM-MR									
RCP 2.6	8	27	39	37	65	94	6	26	44
RCP 4.5	11	29	54	59	87	121	83	121	149
RCP 8.5	32	45	70	77	120	151	202	273	317

Tabla 41. Variaciones del KBDI en verano para cada modelo, escenario y plazo modelado.

La situación es similar para el KBDI, con la diferencia de que los incrementos más significativos se dan en los meses de Septiembre. A largo plazo y para el escenario más grave, el mayor aumento es de 409 puntos, que en el índice significaría un gran incremento en la calificación de riesgo, teniendo en cuenta que el índice cada 160 puntos cambia su calificación, un aumento de más de 400 puntos conlleva sin duda a llevar los valores a situaciones EXTREMAS en verano.

6. CONCLUSIONES

El objetivo general de este trabajo es establecer una metodología de estudio del impacto que tendrá el cambio climático en los índices de riesgo de incendios forestales y aplicarla a la cabecera del Júcar. Para esto se hizo uso de dos índices ampliamente utilizados mundialmente (Carvalho, Carvalho et al. 2011, Ganatsas, Antonis et al. 2011), el FWI y el KBDI, los mismos que fueron desarrollados para detectar situaciones de riesgo de incendio a tiempo real, en escala diaria.

Para alcanzar este objetivo, se desarrolló una nueva propuesta metodológica, esta es la modificación de diferentes componentes de los índices utilizados, para ajustar los valores a una escala mensual, así poder analizar datos mensuales históricos, y evaluar mediante escenarios de cambio climático la influencia que tengan a futuro sobre los incendios.

En la primera etapa del proyecto se analizaron los datos para una serie diaria de 20 años, obteniendo resultados con una clara tendencia a incrementar los valores del índice en época de verano.

Ambos índices mostraron la misma tendencia, con ligeras diferencias, por ejemplo los valores máximos del FWI se alcanzan en los meses de Julio y Agosto, mientras que para el KBDI la situación más extrema son en los meses de Agosto y Septiembre.

A cada uno se le realizó un análisis de sensibilidad a las variables que intervienen en ellos. Para el FWI, las variables tanto de temperatura como de precipitación son menos sensibles a cambios a diferencia de la humedad relativa y velocidad del viento. Mientras que para el KBDI la variable más sensible es la precipitación, mostrando cambios muy significativos ante una disminución considerable de lluvia en los meses, bajo ese escenario, el índice tiende a ubicarse en categorías extremas.

Una vez obtenido los resultados diarios, se calcularon los intervalos de confianza. En el FWI los valores medios con respecto a los mínimos y máximos, presentaron un rango alto de variación, por lo que se optó por analizar también estadísticamente estos intervalos mediante la desviación estándar del percentil 70% y 95%. Para el KBDI la situación fue diferente y se tuvo que la banda creada por los intervalos de confianza de los valores mínimos y máximos era estrecha, por lo que no fue necesario el análisis estadístico para la misma.

Para la segunda etapa, se utilizaron los valores medios mensuales de la serie diaria, para hacer las modificaciones en el mismo. El resultado obtenido mostró que comparando

las curvas diarias contra las mensuales obtenidas de los índices modificados, ambas llevan la misma tendencia y para los meses donde el índice alcanza picos de valores, debido al incremento de la temperatura, disminución de precipitación o cambios en las otras variables, para el caso del FWI, se ajustan de manera que cubren más del 90% de los meses de verano en estudio.

Con en el ajuste de las curvas y comprobando mediante los coeficientes de correlación y Pearson que las mismas se presenten positivas entre sí, se da por validado el cambio de los índices de escala diaria a mensual.

Como conclusión de estas modificaciones hechas a los índices, es la elaboración de la propuesta de FWI y KBDI mensual, que servirán para futuros estudios en los que se requiera como entrada de datos una serie mensual, para variables como precipitación y temperatura.

En la tercera etapa se empieza ya la evaluación mensual de la serie histórica 1940 – 2012, con las modificaciones a los índices en estudio. Lo que se observa con los resultados, es que ambos a pesar de la tendencia de incrementar sus valores en verano, no reflejan los valores extremos de la misma forma. Comparando cada índice con las estadísticas de incendios de la base de datos del MAGRAMA, concluimos que para la situación de riesgo, que está relacionada con el número posible de siniestros durante la temporada de incendio, el FWI es el que mejor se ajusta a la realidad de los datos, es decir que este índice funciona mejor para las condiciones que presenta la cuenca en estudio.

La última etapa del proyecto consiste en aplicar los modelos HadGEM2-ES y MPI-ESM-MR con escenarios de cambio climático, RCP 2.6, 4.5, 6.0 y 8.5. Con la aplicación de escenarios obtenemos una nueva serie de datos con disminuciones en la precipitación e incremento de temperatura, para la mayoría de los meses, que varía de acuerdo al plazo en estudio (2010-2030; 2040-2060 y 2070-2090).

Para el primer modelo, HadGEM2-ES, en corto plazo las variaciones en los valores del índice son muy bajas, a pesar de ello, en ambos índices lograron que en los meses de verano la media supere la calificación de riesgo muy alta para el FWI y alta para el KBDI. En un plazo medio la tendencia a incrementar sigue, es recién en este periodo que los escenarios se van diferenciando, siendo los dos últimos los de mayor crecimiento, pero que mantienen similares condiciones para el caso del FWI, no así para el KBDI cuyos escenarios que alcanzaron los mayores valores fueron el RCP 4.5 y 8.5.

En el periodo de largo plazo, el FWI alcanza valores de incremento de hasta 13 puntos y en el KBDI aumenta hasta 400 puntos de sus respectivas escalas de riesgo para la



situación más crítica, lo que significaría un cambio en las situaciones de riesgo en verano, la tendencia en ambos índices alcanzan los valores EXTREMOS, poniendo en evidencia que a pesar de diferir algunos resultados entre los índices, el comportamiento ante un incremento o disminución de sus variables tiende a presentar situaciones desfavorables a futuro, si se cumplen las condiciones estipuladas para el escenario RCP 8.5.

Finalmente los resultados del modelo MPI-ESM-MR no se diferencian mucho de los alcanzados por el anterior modelo, el FWI alcanza valores de incremento de hasta 10 puntos y en el KBDI aumenta hasta 317 puntos de sus respectivas escalas de riesgo para el último de los escenarios, lo que demuestra la tendencia al incremento de los índices, en especial el plazo largo. Quizás la mayor diferencia es que al contrario del modelo HadGEM2-ES, los meses que alcanzan la calificación de riesgo de incendio EXTREMA son hasta un 5% menos del total de meses analizados.



7. LÍNEAS FUTURAS DE ESTUDIO

Debido a que los incendios forestales son un grave problema en época de verano, en especial con las condiciones climáticas mediterráneas, se considera sugestivo el presente trabajo para que sirva como base a nuevos estudios con similares metodologías o aplicados para diferentes zonas. Algunos de estos estudios o aplicaciones podrían ser los siguientes:

- Adaptar la formulación desarrollada para los nuevos índices mensuales a modelos distribuidos pixel por pixel, esto permitiría la elaboración más detallada de un mapa de riesgo de incendio para diferentes zonas de la provincia, comunidad o país que se aplique.
- Integrar el índice de riesgo KBDI (Keetch and Byram 1968), junto con el índice de peligro FFDI (McArthur 1967), para obtener un índice más completo de prevención contra incendios, puesto que la formulación de este último integra como dato para su cálculo el KBDI, pero todo esto a una escala diaria de datos de precipitación y temperatura.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

Albright, D. and B. Meisner (1999). "Classification of fire simulation systems." Fire management notes.

Anderson, H. W., M. D. Hoover and K. G. Reinhart (1976). "Forests and water: effects of forest management on floods, sedimentation, and water supply."

Bianchini, G. (2006). Wildland fire prediction based on statistical analysis of multiple solutions, Universitat Autònoma de Barcelona.

Bucini, G. and E. F. Lambin (2002). "Fire impacts on vegetation in Central Africa: a remote-sensing-based statistical analysis." Applied Geography **22**(1): 27-48.

Camian, A. and G. Bovio (2000). "Description of the indices implemented in EUDIC software for the European meteorological forest fire risk mapping."

Camino, E. R., J. R. P. Ruggeroni and F. H. Hernández (2014). "Quinto informe de evaluación del IPCC: Bases físicas." Tiempo y Clima **11**(1).

Carvalho, A., A. Carvalho, H. Martins, C. Marques, A. Rocha, C. Borrego, D. Viegas and A. Miranda (2011). "Fire weather risk assessment under climate change using a dynamical downscaling approach." Environmental Modelling & Software **26**(9): 1123-1133.

Cruz, M. G. (2000). "Descrição do Sistema Canadiao de Indexação do Perigo de Incêndio (Description of the Canadian Fire Weather Index System)." p. 30.

Denham, M. M. (2009). "Predicción de la evolución de los incendios forestales guiada dinámicamente por los datos."

Flannigan, M., B. J. Stocks and B. Wotton (2000). "Climate change and forest fires." Science of the total environment **262**(3): 221-229.

Frost, E. J. and R. Sweeney (2000). "Fire regimes, fire history and forest conditions in the Klamath-Siskiyou Region: an overview and synthesis of knowledge." World Wildlife Fund, Klamath-Siskiyou Ecoregion Program, Ashland, OR.

Ganatsas, P., M. Antonis and T. Marianthi (2011). "Development of an adapted empirical drought index to the Mediterranean conditions for use in forestry." Agricultural and forest meteorology **151**(2): 241-250.

Gao, B.-C. (1996). "NDWI—a normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space." Remote sensing of environment **58**(3): 257-266.



GREENPEACE (2013). " Incendios forestales y cambio climático." <http://www.greenpeace.org/espana/es/Trabajamos-en/Bosques/Incendios-forestales-en-Espana/Incendios-forestales-y-cambio-climatico/>.

Hardy, C. C. (2005). "Wildland fire hazard and risk: Problems, definitions, and context." Forest ecology and management **211**(1): 73-82.

<http://cwfis.cfs.nrcan.gc.ca/maps/fw?type=fwi> "Natural Resources Canada."

<http://www.wfas.net/> "Windland Fire Assessment System (WFAS)."

ICONA (1993). Manual de operaciones contra incendios forestales.

Keetch, J. J. and G. M. Byram (1968). A drought index for forest fire control, US Department of Agriculture, Forest Service, Southeastern Forest Experiment Station.

Maddala, G. (1988). "S. 1988." Introduction to Econometrics. New York: Macmillan.

MAGRAMA, M. d. A., Alimentación y Medio Ambiente (2013). "Estudio básico para la protección contra incendios forestales en la interfaz urbano-forestal."

MAGRAMA, M. d. A., Alimentación y Medio Ambiente (2014). "Estadísticas de Incendios Forestales en España." http://www.magrama.gob.es/es/biodiversidad/estadisticas/Incendios_default.aspx

McArthur, A. G. (1967). "Fire behaviour in eucalypt forests."

Moreno, J. M., D. De la Rosa and C. Zazo (2005). "Evaluación preliminar de los impactos en España por efecto del cambio climático."

Moriendo, M., P. Good, R. Durao, M. Bindi, C. Giannakopoulos and J. Corte-Real (2006). "Potential impact of climate change on fire risk in the Mediterranean area." Climate Research **31**(1): 85-95.

Pérez, J. (2004). "EL SECTOR FORESTAL ESTÁ LISTO PARA ENFRENTARSE A UN VERANO DE ALTO RIESGO DE INCENDIOS FORESTALES." <http://webs.uvigo.es/jrperez/s-p-efectos.htm>.

Robichaud, P. R. (2000). "Fire effects on infiltration rates after prescribed fire in Northern Rocky Mountain forests, USA." Journal of Hydrology **231**: 220-229.

Rothermel, R. C. and I. Forest (1972). "A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels."

Rothermel, R. C., R. A. Wilson, G. A. Morris and S. S. Sackett (1986). "Modeling moisture content of fine dead wildland fuels: input to the BEHAVE fire prediction system."

Scott, D. and D. Van Wyk (1990). "The effects of wildfire on soil wettability and hydrological behaviour of an afforested catchment." Journal of hydrology **121**(1): 239-256.

Shakesby, R., C. Coelho, A. Ferreira, J. Terry and R. Walsh (1993). "Wildfire impacts on soil-erosion and hydrology in wet Mediterranean forest, Portugal." International Journal of Wildland Fire **3**(2): 95-110.

Stocker, T. F., Q. Dahe and G.-K. Plattner (2013). "Climate Change 2013: The Physical Science Basis." Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Summary for Policymakers (IPCC, 2013).

Stott, P. (2013). "Highlights from IPCC WGI AR5 report and MOHC contribution." MOSAC-18 BRIEFING PAPERS: 155.

Vallejo, R. and A. Valdecantos (2006). "Incendios Forestales."

Van Wagner, C. (1987). Development and structure of the Canadian forest fire weather index system.

Van Wagner, C. E. (1974). "Structure of the Canadian forest fire weather index."

Vicente, J. (2007). "Análisis de causas y riesgo de incendios forestales."

Viro, P. (1974). "Effects of forest fire on soil." Fire and ecosystems: 7-45.

Wastl, C., C. Schunk, M. Leuchner, G. B. Pezzatti and A. Menzel (2012). "Recent climate change: long-term trends in meteorological forest fire danger in the Alps." Agricultural and Forest Meteorology **162**: 1-13.

Weber, R. (1991). "Modelling fire spread through fuel beds." Progress in Energy and Combustion Science **17**(1): 67-82.

Westerling, A. and B. Bryant (2008). "Climate change and wildfire in California." Climatic Change **87**(1): 231-249.

White, J. D., K. C. Ryan, C. C. Key and S. W. Running (1996). "Remote sensing of forest fire severity and vegetation recovery." International Journal of Wildland Fire **6**(3): 125-136.