UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS AGRÓNOMOS

DEPARTAMENTO DE ECONOMÍA Y CIENCIAS SOCIALES AGRARIAS

Impacto del cambio climático en el viñedo en España

AUTOR: PABLO RESCO SÁNCHEZ

TUTORA: ANA IGLESIAS PICAZO

Madrid, 2012

TABLA DE CONTENIDO

Introducción y objetivos 3

Antecedentes 4

El clima en España y el cambio climático 4

Escenarios futuros de cambio climático en España 5

La influencia del clima en el viñedo 7

La zonificación climática 10

Impacto del cambio climático en las zonas vitivinícolas 11

Metodología 14

Resultados 14

Variables climáticas 16

Índices climáticos 20

Índice heliotérmico de huglin 20

Índice de frescor nocturno 25

Indice de sequía 29

Conclusiones 33

Bibliografía 36

Anexo 1. Evolución de la cantidad diaria de las precipitaciones 41

Anexo 2. Índice heliotérmico de huglin 50

Anexo 3. Índice de frescor nocturno 53

Anexo 4. Cálculo de evapotranspiración de referencia 56

Anexo 5.Indice de sequía 68

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

El sector vitivinícola se enfrenta a varias incertidumbres y riesgos en los próximos años, muchos de ellos interconectados. En primer lugar el proceso de globalización implica una mayor competencia en el mercado, más aún si cabe debido al contexto económico actual. La caída del consumo tanto en nuestro país, como en los países tradicionalmente productores y consumidores del sur de Europa, junto con la eliminación de algunas medidas de regulación de los mercados como la destilación de usos de boca en la OCM del vino a partir de 2010, han hecho no sólo que cada vez más un mayor volumen de vinos en nuestro país se dediquen a la exportación (MEC 2012), sino los vinos tengan que competir en calidad y precio, y adaptarse a nuevos mercados para atraer a nuevos tipos de consumidores.

Aunque el mayor peso de las exportaciones sigue siendo los graneles con destino a Francia (MEC 2012), cada vez son más importantes las exportaciones a nuevos mercados como por ejemplo países del Norte de Europa, o EEUU, donde el consumo sigue creciendo y donde los vinos españoles ya no sólo compiten con los vinos franceses o italianos, sino cada vez más con los llamados vinos del "Nuevo Mundo" (Chile, Australia o Sudáfrica principalmente). Para competir en esos nuevos mercados donde la cultura del vino es relativamente nueva y donde los vinos españoles son relativamente desconocidos es muy importante el encontrar un buen equilibrio entre calidad y precio que junto con otras herramientas permitan una mejor penetración dentro de esos mercados.

Dada la dependencia de la agricultura en general del clima, es muy importante tener en cuenta las oportunidades y riesgos que puede traernos posibles cambios que pueden venir de la mano de otro de los grandes retos a los que se enfrena el sector: el Cambio Climático. Aunque este proceso no es nuevo, de hecho se ha venido analizando en el caso concreto de España y se ha podido constatar que particularmente desde la década de los 70 del el siglo XX, las temperaturas en España han aumentado de forma general, con una magnitud algo superior a la media global del planeta, mientras que las precipitaciones durante este periodo han tendido a la baja, sobre todo en la parte meridional (Moreno Rodríguez 2005). Sí que preocupa los resultados de los modelos de predicción que prevén un mayor calentamiento, y muy probablemente una mayor intensidad de fenómenos climáticos adversos, en el sistema climático mundial durante el siglo XXI que los observados durante el siglo XX (Meehl, y otros 2007).

Obviamente en las actuales zonas de producción, estos cambios podrían tener importantes consecuencias tanto en la calidad de la uva como en el potencial productivo de la uva, influyendo de forma determinante en primer lugar, en el rendimiento económico de la explotación, y segundo en la capacidad del sector vinícola de competir en el mercado. No obstante estos cambios también podrían ocasionar la plantación y elaboración de vinos donde antes no era posible por causas climáticas, incluso en países sin ninguna tradición, lo que daría más complejidad al mercado actual del vino

Es necesario por ello que el sector vitivinícola cuenten con estrategias de adaptación teniendo en cuenta las peculiaridades de cada región, y que estas cuenten con el respaldo de los programas de apoyo las administraciones públicas, de forma que se asegure la rentabilidad de un sector netamente exportador y con gran importancia socioeconómica en las zonas rurales. Para elaborar las estrategias de adaptación es muy importante primero evaluar todos los escenarios posibles de forma que el sector y las administraciones cuentes con una valiosa información que le sirva a la hora de tomar decisiones en los próximos años.

El objetivo de este trabajo es medir el impacto que el cambio climático podría tener en las zonas vitivinícolas españolas. Para ello es conveniente analizar cuál será el comportamiento de las variables climáticas que más influyen en el comportamiento del viñedo de forma general en toda España, y analizar los cambios que se podrían producir en los índices que comúnmente se usan para clasificar el clima en las regiones vitivinícolas. Para ello es necesario contar con los escenarios climáticos con datos referenciados geográficamente lo más adaptados a la península ibérica. Analizaremos por tanto los escenarios que se han venido desarrollando estos últimos años en proyectos europeos y nacionales dentro de los programas de mitigación y adaptación al cambio climático.

ANTECEDENTES

Es este apartado haremos un estudio bibliográfico de toda la información que pueda ser interesante para nuestro estudio.

EL CLIMA EN ESPAÑA Y EL CAMBIO CLIMÁTICO

El clima de España es enormemente diverso debido a su compleja topografía y situación geográfica. Esta diversidad climática hace de la Península Ibérica un lugar privilegiado para que se produzcan vinos de características muy diferenciadas y de hecho encontramos viñedo en prácticamente todos los climas de la península. A esta diversidad hay que añadir la elevada variabilidad climática interanual y la notable amplitud de valores diarios extremos, muy condicionada por diversos patrones de circulación general de la atmósfera en el hemisferio norte, entre los que destaca la llamada Oscilación del Atlántico Norte (Castro, Martıín-Vide y Alonso 2005). Esta variabilidad se manifiesta en forma de temperaturas frías extremas en invierno, heladas primaverales, tormentas, vientos de alta velocidad, inundaciones, granizos muy tardíos en primavera-verano y olas de calor durante el verano o ciclos de sequía que pueden durar varios años. Por ejemplo el coeficiente de variación pluviométrica interanual está entre el 20% y el 40% (Castro, Martıín-Vide y Alonso 2005). En el viñedo es la intensidad de estos fenómenos la que da lugar a las variaciones interanuales de calidad y rendimiento del viñedo en cada añada.

A esta variabilidad hay que sumar los efectos del calentamiento del sistema climático, un proceso que es inequívoco, como evidencian ya los aumentos observados del

promedio mundial de la temperatura del aire y del océano, el deshielo generalizado de nieves y hielos, y el aumento del promedio mundial del nivel del mar. Estas observaciones de series históricas indican que los cambios en las temperaturas son más intensos en las regiones septentrionales y en las zonas terrestres. La evolución de las precipitaciones tampoco ha sido homogénea, ya que aunque a lo largo de todo el siglo aumentaron por ejemplo en Europa septentrional y América del Norte, mientras disminuyeron en zonas como el Sahel y en el mediterráneo, siendo probable que las superficies afectadas por la sequía, o que la frecuencia de fenómenos climáticos extremos como olas de calor, precipitaciones intensas también hayan aumentado desde los años 70 (IPCC 2007).

Este proceso se ha venido analizando en el caso concreto de España, y a pesar de la incertidumbre proveniente de su alta variabilidad se ha podido constatar que durante el siglo XX, y particularmente desde la década de los 70 de ese siglo, las temperaturas en España han aumentado de forma general, con una magnitud algo superior a la media global del planeta, especialmente en invierno (Moreno Rodríguez 2005).

Por otra parte, también las precipitaciones durante este periodo han tendido a la baja, sobre todo en la parte meridional (Moreno Rodríguez 2005) y ha aumentado significativamente su variabilidad. El resultado es un aumento de la evapotranspiración con consecuencias para la disponibilidad y calidad de agua. Además, el impacto social de la sequía en España es creciente debido a la concentración de la población en zonas urbanas, el aumento de la población estacional, los controles inadecuados del uso del agua, las limitaciones a la iniciativa política, y los impedimentos culturales. La sequía afecta a la mayoría del territorio, pero sus impactos varían entre los distintos sectores, grupos de usuarios y regiones.

ESCENARIOS FUTUROS DE CAMBIO CLIMÁTICO EN ESPAÑA

Efectos del calentamiento y de la mayor variabilidad climática

Teniendo en cuenta el comportamiento del clima durante el pasado reciente y analizando los resultados de los modelos de comportamiento del clima, lo que parece probable es que si continúa el nivel de emisiones de gases de efecto invernadero a tasas actuales o superiores se causaría un mayor calentamiento y se inducirán muy probablemente cambios en el sistema climático mundial durante el siglo XXI, muchos más que los observados durante el siglo XX (Meehl, y otros 2007). De hecho para las próximas dos décadas, se proyecta un calentamiento de unos 0,2°C por decenio para una gama de escenarios de emisiones IE-EE (Informe Especial sobre Escenarios de Emisiones). Incluso si las concentraciones de todos los gases de efecto invernadero y de aerosoles se hubieran mantenido constantes en los niveles del año 2000, podría esperarse un calentamiento ulterior de 0,1°C aproximadamente por decenio (IPCC 2007) así como cambios en probabilidades de ocurrencia de determinados fenómenos como se puede ver en la

Tabla 1. .

Tabla 1. Tendencias recientes, evaluación de la influencia humana en la tendencia y proyecciones de fenómenos climáticos de las cuales existe una tendencia observada a finales del siglo XX (IPCC 2007).

Fenómeno[a] ydirección de la tendencia	Probabilidad de ocurrencia de la tendencia a finales del siglo XX (típicamente después de 1960)	Probabilidad future de tendencias basadas en proyecciones para el siglo XXI usando escenarios SRES
Días y noches más cálidos y menos fríos	Muy probable[a]	Prácticamente cierto[b]
Mayor frecuencia de días y noches más cálidos	Muy probable[c]	Prácticamente cierto[b]
Aumento de la frecuencia Periodos de calor/olas de calor	Probable	Muy probable
Incremento de la frecuencia de Fenómenos de intensas lluvias.	Probable	Muy probable
Incremento de las áreas afectadas por más sequías	Probable en muchas regiones desde 1970	Probable
Incremento de la actividad de ciclones tropicales intensos	Probable en algunas regiones desde 1970	Probable
Mayor incidencia de niveles del mar altos extremos	Probable	Probable[d]

Notas de la Tabla:

a Disminución en la frecuencias de días y noches fríos (más frío 10%).

b Calentamiento de las noches y los días más extremos cada año.

e Incremento de la frecuencia de los días y las noches de calor (más calurosos 10%).

d En todos los escenarios para 2100, el nivel medio del mar a escala mundial proyectado es más elevado que el del periodo de referencia. {10.6} El efecto de los cambios en los sistemas climáticos regionales sobre niveles del mar extremos no ha sido evaluado.

Estas proyecciones se basan en modelos climáticos globales (GCMs) que simulan de forma muy aceptable los grandes rasgos del cambio climático observado y que una gran parte de ellos coinciden cuantitativamente sobre muchos aspectos del cambio climático futuro (AchutaRao, y otros 2004); (IPCC 2007); pero poseen una resolución espacial insuficiente para representar el clima a escala regional. Para mejorar esta resolución en la simulación de los efectos del cambio climático se usan técnicas de regionalización (Giorgi y Mearns 1991) que aprovechen la información de gran escala de los GCMs, pero se aplican a un área limitada del globo, de forma que pueden ser ejecutados con mayor resolución y resolver adecuadamente la orografía, líneas de costa, usos de suelo, etc. (Fernández, y otros 2012). Estas técnicas presentan dificultades para simular y atribuir los cambios de temperatura observados a escalas inferiores a la continental (Forster, y otros 2007), por lo que existen todavía incertidumbres asociadas no sólo a las técnicas de regionalización, sino también y de forma general a la evolución futura de las emisiones de GEI, a la concentración de dichos gases en la atmósfera, a la simulación de los procesos en el seno del sistema climático, etc.

El resultado de todas las simulaciones en todos los casos los escenarios de cambio climático implica un aumento de las temperaturas pero también cierta asimetría, con un mayor calentamiento futuro en el sur de Europa para los extremos cálidos que se

relaciona con el déficit de humedad del suelo en verano, pero con un menor enfriamiento en los meses más fríos, sobretodo en el sudeste de la península ibérica (van der Linden y Mitchell 2009), incrementos mayores en los extremos que en las medias (Frías, Gutiérrez y Méndez 2012), y que concuerda con otros trabajos posteriores (Nikulin, y otros 2011). Esto podría llegar a ocasionar un incremento de las olas de calor sobre todo en la mitad sur peninsular y, como hemos mencionado, en la precipitación donde nos encontramos con una disminución clara sobre todo en verano y en el sudoeste de la península, mientras que en la costa mediterránea este dato es más incierto. También se esperan disminuciones en la velocidad del viento para todo el sur de Europa (van der Linden y Mitchell 2009).

Para aproximar aún más las predicciones a las condiciones de nuestro país, el Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático (PNACC) aprobó el desarrollo de una nueva generación de escenarios regionales de cambio climático para el territorio español utilizando todas las técnicas disponibles (Oficina Española de cambio climático 2006). Hasta ahora estaban disponibles los resultados de un conjunto de simulaciones realizadas con modelos regionales (RCM) dentro del proyecto europeo Ensembles cuyos principales objetivos son proporcionar proyecciones regionalizadas de cambio climático para Europa mediante regionalización dinámica para el s.XXI así como explorar la incertidumbre asociada a estas proyecciones. Dentro de este plan se han desarrollado una nueva generación de escenarios regionales que se nutre de la colaboración de distintos grupos de investigación e instituciones con experiencia en estos temas, organizados en dos acciones estratégicas del Plan Nacional de I+D+i 2008-11 para regionalización estadística (ESTCENA) y dinámica (ESCENA), junto con los proyectos de regionalización llevados a cabo en AEMET mucho más adaptados a las condiciones de la península ibérica (Gutiérrez, 2012).

LA INFLUENCIA DEL CLIMA EN EL VIÑEDO

Desde su introducción en la península ibérica el cultivo de la vid ha evolucionado debido a tanto factores humanos como naturales. Es a partir del desarrollo económico y la normalización del comercio al final de la Alta Edad Media cuando empiezan a definirse las zonas vitícolas tal como las conocemos actualmente. El crecimiento económico y el aumento del comercio, a partir de este momento permitieron una selección paulatina de las mejores zonas y su posterior expansión, siendo abandonadas las plantaciones poco productivas o de muy mala calidad situada en zonas geográficamente no eran idóneas.

Tabla 2 Necesidades según los periodos de crecimiento.

Etapa	Fecha de inicio	Necesidades
Etapa I (brotación)	Mediados de marzo o la primera semana de abril con T media > 10º C	Abundante humedad del suelo y el sol, con temperaturas superiores a 10 º C para el crecimiento vegetativo sostenido. Las heladas pueden reducir rendimientos y calidad.
Etapa II (desde floración hasta envero)	Final primavera, con T media >15º C	Condiciones secas y temperaturas estables para no obstaculizar el crecimiento de las flores.
Etapa III (envero y su maduración hasta cosecha)	A finales de julio o la primera semana de agosto	ι Condiciones secas para limitar la podredumbre de la uva con temperaturas moderadas, pero sin estrés excesivo ι Salto térmico importante entre el día y la noche en maduración ι Maduración en época fresca pero con calor suficiente para continuar la acumulación de azúcares y desarrollo del aroma de las bayas
Etapa V (latencia)	generalmente a finales de septiembre mediados de octubre	Invierno frío y lluvioso

Así, la distribución geográfica actual del cultivo de la vid se debe en gran parte al propio ecosistema, dentro del cual el clima el más importante debido a su influencia en la fisiología de la vid a través de las temperaturas, la lluvia, el déficit de presión de vapor, evapotranspiración potencial, horas de sol y viento (van Leeuwen, Friant, y otros 2004). En la Tabla 2 Necesidades según los periodos de crecimiento donde se indican las necesidades del cultivo según los periodos de crecimiento

Dada la importancia del clima en la vid, cualquier modificación de estas variables climáticas de una región que altere el equilibrio con el suelo y la vid, podría tener grandes efectos sobre la calidad de la uva (Seguin y de Cortazar 2005) o los rendimientos.

TEMPERATURA

En el caso de las temperaturas la vid es una planta sensible a heladas y exigente en calor para su desarrollo y la maduración de los frutos. La temperatura durante el periodo de activo de vegetación y su amplitud son aspectos críticos debido a su gran influencia en la capacidad de madurar las uvas a niveles óptimos de azúcar, ácido y

sabor con el fin de maximizar un determinado estilo del vino y su calidad (G. V. Jones, M. A. White, y otros 2005), aunque la cantidad de calor que la uva requiere para madurar completamente varía enormemente entre las diferentes variedades.

También la temperatura del aire en el periodo de maduración (Jackson y Lombard 1993) o más aún, la diferencia de temperaturas entre el día y la noche durante este periodo tienen grandes influencias en este proceso, incluyendo aromas y coloración (Singleton y Esau 1969); (Kliewer y Torres 1972); (W. Kliewer 1973); (Tomana, Utsunomiya y Dataoka 1979); (Fregoni y Pezzutto 2000); (Tonietto y Carbonneau 2004). Así la uva poco madura por bajas temperaturas produce vinos poco alcohólicos y ácidos, lo contrario que con temperaturas más altas.

En cuanto a sus límites, se admite en general que la vid resiste temperaturas en periodo de vegetación de hasta los -1,5º C y en periodo invernal hasta los -12º C para las yemas y los -20º C para la madera. Aunque para obtener una calidad adecuada su temperatura media anual óptima está entre los 11º C y los 18º C, con un mínimo de 9º C y un máximo que puede llegar en valor absoluto a sobrepasar los 40º C, aunque en general temperaturas excesivamente altas durante largos períodos de tiempo dañan la calidad. Así en general interesa una brotación precoz, resultante de una temprana elevación de temperatura al final de un invierno frío, una parada del crecimiento precoz al final de la primavera, resultante de elevados productos heliotérmicos y sin acusada sequía y una largo periodo de maduración moderadamente cálido (Hidalgo 2002) con contrastes fuertes entre día y noche (ver Tabla 3) . Así en el efecto sobre el color se ha constatado que la síntesis óptima de antocianos se produce a 17-26ºC y que temperaturas nocturnas de 15-20ºC dan mayor coloración al hollejo que temperaturas nocturnas más altas. (G. V. Jones 1999).

Tabla 3. Condiciones climáticas durante la maduración (Sotés 2004).

	Impacto en la composición de la baya
Días cálidos y noches cálidas	ι Buena producción de azúcares, escasa acidez, poco color y baja concentración de taninos. ι Condiciones buenas para uva de mesa y pasificación ι No aconsejable para producción de uva de calidad.
Días cálidos y noches frías	ι Buena producción de azúcares. ι Conservación de ácidos, color y aromas. ι El mejor para producir vinos de calidad.
Días fríos y noches cálidas	ι Bajo contenido en azúcares, pocos aromas y poca producción de color. ι Elevada acidez. Esto puede suceder en condiciones de estrés hídrico. La baya no alcanza la madurez total.
Días fríos y noches frías	ι Adecuado para actividad general reducida. ι Poco aconsejable durante maduración

HUMEDAD

Por otro lado la vid resiste muy bien la falta de humedad. De hecho un exceso de lluvia, además de provocar problemas de enfermedades en la planta y en los racimos, puede perjudicar la maduración de la uva. Dentro de su ciclo vegetativo necesita inviernos y primaveras que aporten humedad suficiente al suelo, aunque sin un exceso de lluvias primaverales que podrían favorecer la aparición de enfermedades en la brotación. Su

sistema radicular le permite aprovechar esta humedad de las capas profundas, y resistir así la sequía estival típica del mediterráneo; de hecho para una correcta floración y maduración necesita ambientes secos, siempre que la falta de humedad no sea excesiva. Esta restricción hídrica moderada juega un importante papel en el vigor de la vid y la reducción del rendimiento, así como en la mejora del potencial cualitativo (Duteau, Guilloux y Seguin 1981); (Matthews y Anderson 1988); (van Leeuwen y Seguin 1994); (Trégoat, y otros 2002); (Coipel, y otros 2006). Aunque para el cálculo de las necesidades hídricas del cultivo de la vid es preciso estudiar no sólo la cantidad de precipitaciones y su distribución, también el potencial de evapotranspiración (Seguin 1983); (Mérouge, Seguin y Arrouays 1998); (Carbonneau 1998) ya que la transpiración foliar está ligada con las condiciones de humedad del suelo y déficit de presión de vapor en la atmósfera (Xavier, y otros 2001).

RADIACIÓN

Por otro lado la vid precisa de una radiación elevada, mínima de 1.500 a 1.600 horas anuales, de las que debe corresponder un mínimo de 1.200 horas al periodo de vegetación para la fotosíntesis (Hidalgo 2002) y es importante para la madurez y color de los racimos, mientras que los vientos en algunos casos pueden ser beneficiosos aportando humedad y favorecer la fecundación, o dañinos si son huracanados, demasiado cálidos o demasiado fríos, sobre todo cuando actúan directamente sobre la cepa.

VIENTO

La importancia de los vientos depende mucho de la topografía del terreno y de las características específicas de la zona. En algunos casos pueden ser beneficiosos al reducir la temperatura o favorecer la fecundación, o dañinos si son huracanados, demasiado cálidos o demasiado fríos, sobre todo cuando actúan directamente sobre la cepa. El efecto también depende del estado fenológico o del momento en el que tenga lugar, por ejemplo un viento seco puede desecar el fruto haciendo perder producción y calidad a la cosecha o reducir la aparición de enfermedades si tiene lugar con el rocío.

LA ZONIFICACIÓN CLIMÁTICA

Con la zonificación vitícola se pretende la caracterización espacial de las zonas que puedan producir las uvas y los vinos de composiciones similares, al tiempo que permite las decisiones operativas que deben aplicarse a las distintas etapas de producción (Vaudour 2003), aunque esta zonificación difiere en la importancia a cada factor. Desde la perspectiva del Nuevo Mundo, se ha puesto mucho más énfasis sobre el clima, dando escasa atención a los suelos y su compleja interacción con la uva (White 2003) mientras que los estudios europeos suelen remarcar también la importancia del suelo (Vaudour 2003)

En los últimos años, la zonificación vitícola ha asumido un mayor grado de importancia, alentado por los esfuerzos de todo el mundo para producir vinos de calidad para unos

mercados altamente competitivos. Dentro de esta zonificación los índices agro-climáticos son muy útiles para medir la influencia del clima en el desarrollo de la vid y la maduración de la uva y ayudar así a una correcta elección de la variedad para cada zona. La fenología de la vid puede ser trazada como la suma de las temperaturas activas, lo que permitió por ejemplo en California la división en zonas que representan bastante bien diversas calidades de la uva y algunas de las características del vino como resultado de la influencia climática de esta zona (Winkler,1974); o con una aplicación a escala más global, mostrar una buena relación con el potencial de contenido de azúcar de la uva (Huglin, 1978).

Pero como hemos visto en el capítulo anterior, la complejidad de los procesos en la uva no podría explicarse sólo con un solo índice, la temperatura del aire en el periodo de maduración (Jackson, 1993) o más aún el frescor de las noches (Singleton y Esau 1969); (Kliewer y Torres 1972); (W. Kliewer 1973); (Tomana, Utsunomiya y Dataoka 1979); (Fregoni y Pezzutto 2000); (Tonietto y Carbonneau 2004) tienen grandes influencias en la maduración, incluyendo aromas y coloración. La importancia de la disponibilidad de agua para la calidad también viene respaldada por muchos estudios (Seguin 1983); (Mérouge, Seguin y Arrouays 1998); (Carbonneau 1998)) y que se ve reflejada con un índice específico de potencial hídrico de los suelos para la vid (Riou, Becker, y otros 1994) que permite delimitar regiones según la disponibilidad de agua para la vid. De forma integral en 2004 Tonietto y Carbonneau (Tonietto y Carbonneau 2004) desarrollaron lo que denominaron la clasificación climática multicriterio de Geoviticultura Climático (GMCC en sus siglas en inglés), un sistema de clasificación climática de regiones vitícolas sobre la base de la integración de las diferentes clases de los tres índices climáticos más importantes (sequía, heliotérmico y frescor nocturno) que establece el clima de cada región vitícola y permite a las regiones clasificarse y agruparse.

IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LAS ZONAS VITIVINÍCOLAS

Como hemos visto, el trabajo realizado en estas últimas décadas en el estudio del clima indica que van a continuar los cambios en el régimen de temperaturas y de precipitaciones, lo que podría ocasionar alteraciones no sólo en la fenología de la vid, también en los patrones de enfermedades y plagas, en el potencial de maduración y en definitiva, en los tipos de vino de cada una las zonas (Kenny y Harrison 1992); (Schultz 2000); (G. Jones, y otros 2005a); (Santos, Grätsch, y otros 2012) en mayor o menor medida. Estos cambios no sólo afectarán a las medias, también en la frecuencia de determinados fenómenos climáticos adversos, que podrían limitar aún más la capacidad de adaptación.

Unas temperaturas más cálidas al inicio del periodo vegetativo llevarían a un aumento más rápido y temprano de superficie foliar con un efecto positivo sobre la acumulación de biomasa. No obstante si el aumento de la temperatura fuese excesivo podría acortar la duración del periodo de crecimiento, haciendo que la vid pase a través de sus eventos fenológicos más rápidamente (G. V. Jones 2007), en las zonas de cultivo

actuales y en particular, la duración de la maduración. Este hecho puede causar un cambio en el desarrollo, de modo que las mismas fases de crecimiento se producirían en regímenes de radiación distintos al tradicional. En el caso de que se superasen los umbrales ideales de una variedad, el periodo de maduración coincidiría con un período de radiación excesivamente alto, lo que tendría efectos negativos en la calidad (Bindi, Fibbi y Gozzini, Modelling the impact of future climate scenarios on yield and yield variability of grapevine 1996), al ocasionar un exceso de madurez y de azúcares en la uva. También habría que tener en cuenta un calentamiento asimétrico día-noche: un descenso del diferencial de temperaturas acortaría la maduración y podría llegar a disminuir la calidad de la uva.

Por otro lado un aumento en de los extremos de temperatura también provocarían una mortalidad alta a través de abscisión uva (Mullins, Bouquet y Williams 1992), lo que aumentaría de la variabilidad del rendimiento. Por el contrario, la disminución en la frecuencia de heladas en otoño en las zonas demasiado frías, aumentaría la duración de la estación de crecimiento (Myneni, y otros 1997).

En general el descenso de las precipitaciones implicará un descenso en el rendimiento, haciendo de la producción vinícola un negocio con menos beneficios. Pero en las regiones con los veranos más húmedos podría dar lugar a un incremento de la calidad, ya que para obtener uvas rojas de alto potencial cualitativo es necesario un moderado estrés hídrico (van Leeuwen, Friant, y otros 2004). Por otro lado el aumento de la temperatura en combinación con una posible disminución de las precipitaciones, ocasionará un aumento de las necesidades hídricas de los cultivos en los años secos. Esto conllevaría obviamente la necesidad de aportes de agua para el regadío sobre todo en las zonas más secas y cálidas. Esta estrategia presentaría problemas puesto que la disponibilidad de agua a bajo coste (o nulo) es cuestionable debido a la hidrogeología y a la competencia entre usuarios. La posibilidad de aumentos en la superficie regada, en el caso de haber agua disponible, también estaría determinada por consideraciones económicas y sociales.

Por otro lado como ya hemos visto, el aumento de las temperaturas aceleraría el ciclo de la planta pudiendo coincidir las lluvias primaverales con la floración y el desarrollo del fruto lo que perjudicaría un proceso que necesita ambientes más secos. Además altas temperaturas primaverales con gran disponibilidad de agua en el suelo podrían hacer que la planta privilegie el desarrollo vegetativo frente a la producción de uva. Este exceso de humedad también podría aumentar el riesgo de brotes de enfermedades por hongos o transmitidas por insectos.

En el caso del aumento de la concentración de CO_2 podría resultar en una mayor acumulación de fruta y la biomasa total ya que estimula la fotosíntesis y el crecimiento (Kimball B.A. 1993), (Rogers H.H. 1993). Hasta ahora se han realizado pocos estudios en campo que cuantifique la respuesta de la vid este aumento del CO_2; (Bindi, Fibbi y Miglietta 2001 a); (Bindi, Fibbi y Miglieta 2001 b), pero estos en general, concluyeron que el doblar los niveles de CO_2 en la atmósfera daría lugar a un fuerte aumento del rendimiento sin tener ninguna repercusión negativa o positiva en las uvas en la etapa de madurez. Es más estudios posteriores aseguran que incrementos modestos de la concentración de CO_2 también tendrían un notable impacto positivo sobre la tasa de

fotosíntesis y sobre los rendimientos finales sin que la planta experimentase aclimatación (Gonçalves, y otros 2009)

Tabla 3 Potenciales efectos del cambio climático en España

Factor de cambio	Posibles beneficios	Posibles efectos negativos
Aumento de temperaturas	Periodos de crecimiento más rápidos. Menor riesgo de heladas	Aumento del estrés térmico. Disminución de la calidad (menor ácidez, color y taninos). Aumento grado alcohólico. Exceso desarrollo vegetativo. Mayor riesgo de incendios. Aumento de plagas y enfermedades. Aumento variabilidad del rendimiento.
Aumento de olas de calor		Descenso del rendimiento
Disminución de la precipitación	Menor riesgo de enfermedades en zonas húmedas. Mejora de la calidad en zonas húmedas.	Aumento de la frecuencia de sequías. Mayor riesgo de incendios. Disminución de rendimientos.
Aumento de lluvias intensas o tormentas		Aumento de la erosión

En general, estas simulaciones no dan una respuesta concluyente a la pregunta de si los posibles efectos negativos de las temperaturas más cálidas serían compensados por los efectos positivos del aumento de la concentración de CO_2 de forma global. Lo que

parecen indicar es que el solapamiento de estos dos fenómenos, y teniendo en cuenta el incremento de la variabilidad del clima, también aumentará aún más la variabilidad interanual de los rendimientos, aunque sin garantizar la calidad del vino en los años buenos ni satisfacer la demanda de vino en los años malos, lo que implica un mayor riesgo económico para los productores. (Moutinho-Pereira, Gonçalves y Bacelar 2009).

Como efectos indirectos podríamos hablar de que en un escenario de calentamiento global y de aumento de la sequía estival, cabe esperar una degradación de la cubierta vegetal y un aumento de la frecuencia de los incendios forestales. Estas condiciones pueden representar un aumento de la frecuencia y severidad de las crecidas y de los fenómenos de erosión de los suelos en cuencas de pequeño tamaño (Benito 2005).

Como efecto indirecto también podemos incluir las modificaciones en el comportamiento de plagas y enfermedades que afectan a los cultivos que el aumento de las temperaturas podría provocar. Unos inviernos más suaves favorecerían su desarrollo ya que, la mayoría de las especies de plagas y enfermedades se ven favorecidas por condiciones templadas y húmedas. También un cultivo debilitado por un esperado aumento de los eventos climáticos extremos, sería infectado más fácilmente por un hongo que en condiciones normales.

El clima también afecta a los pesticidas usados para controlar o prevenir la aparición de plagas. En un clima distinto al actual y cambiante, las plagas podrían volverse más activas todavía y los agricultores tendrían que usar aún más productos químicos para combatirlas (incluso a pesar de las técnicas alternativas que existen para hacerles frente), aunque la normativa europea es cada vez más exigente en este punto por los costes ambientales y de salud. En la Tabla encontramos un resumen de los cambios potenciales así de sus principales efectos

METODOLOGÍA

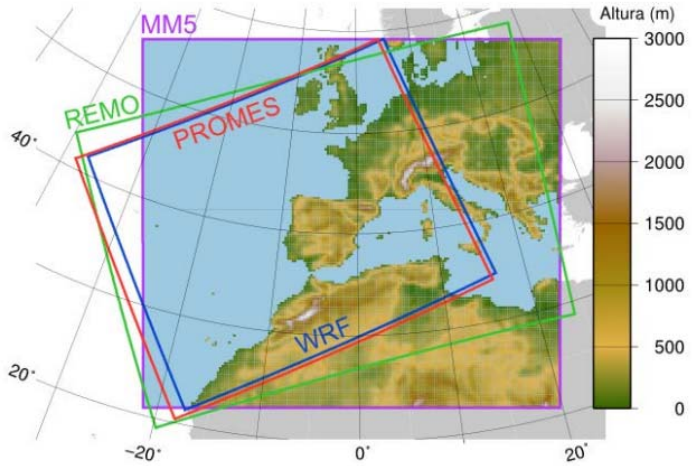
Para el estudio se usarán los datos climáticos que proporcionan los modelos regionales (RGM) provenientes del proyecto ESCENA, por ser lo más adaptados a la Península Ibérica, así como los más recientes. Se calcularán la evolución de los índices más representativos de la viticultura desde el escenario base hasta 2050, año hasta donde alcanzan las proyecciones. Haciendo una evaluación de las superficie que modificaría su zonificación, así como de las zonas que se verán más afectadas.

RESULTADOS

Tanto ESCETNA como ESCENA persiguen la producción de escenarios de cambio climático para la primera mitad del siglo XXI complementarios a los producidos en el marco de proyectos anteriores como ENSEMBLES. En este sentido, comparte con éste resolución espacial, aunque el dominio de simulación se ha centrado sobre la Península Ibérica (ver **Figura 1**) y para ello se han utilizado 4 modelos regionales diferentes que representan el estado del arte de la modelización numérica de la

atmósfera a alta resolución, dando lugar a 11 proyecciones diferentes (Fernández, y otros 2012). Las proyecciones parten de la base de los datos recogidos en una serie de estaciones meteorológicas desde 1951 hasta el año 2000 y se presentan en una rejilla de 20 km de lado.

Figura 1 Dominio espacial cubierto por cada uno de los modelos regionales de ESCENA. (Fernández, y otros 2012) **adaptada de Jiménez-Guerrero, 2012.**



Estas proyecciones futuras arrojan resultados sobre diversos escenarios, aunque a la hora de realizar el estudio sólo estaban los datos disponibles del escenario A1B, que describe un mundo futuro con rápido crecimiento, una población mundial que alcanza su máximo a mediados de siglo y disminuye posteriormente, y rápida una introducción de tecnologías nuevas y más eficientes. Sus características distintivas son la convergencia entre regiones, la creación de capacidad y el aumento de las interacciones culturales y sociales, acompañada de una notable reducción de las diferencias regionales en cuanto a ingresos por habitante. También prevé un consumo equilibrado entre combustibles de origen fósil y otras fuentes de energía no fósil.

Las proyecciones de ESCENA estudian hasta 11 modelos, aunque debido a que algunos y datos no estaban presentes o necesitaban correcciones en algún caso puede faltar algúno y presentados en una malla con divisiones de 20 Km de lado. Las datos que se estudian son los siguientes:

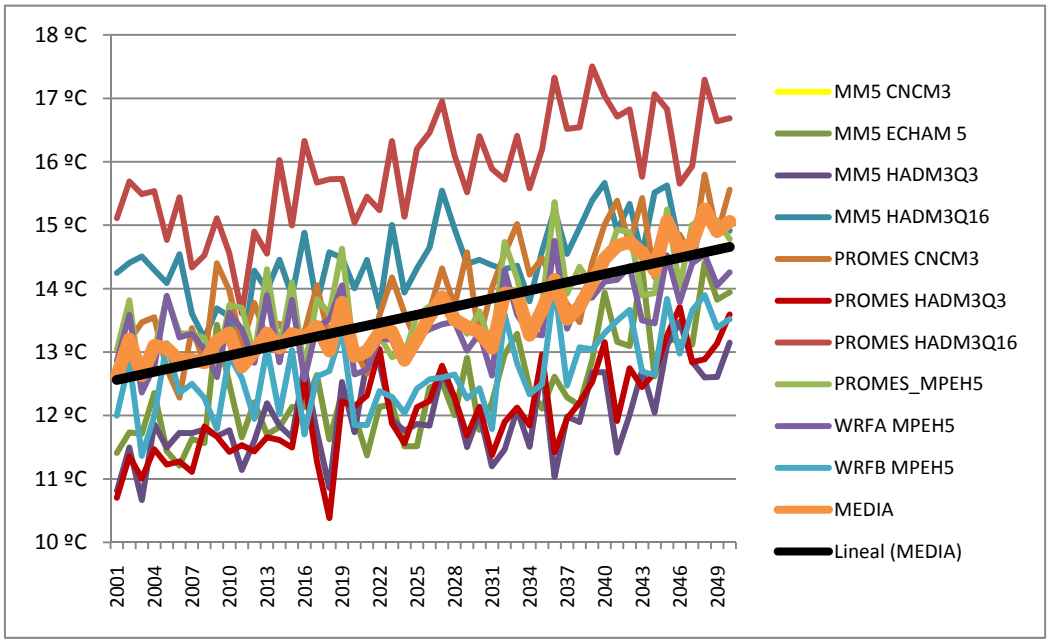
- CDD: (consecutive dry days) número máximo de días secos consecutivos con P <1 mm.
- DD (dry days): número de días secos con P <1 mm.
- FD: (Total number of frost days) días con una T mínima absoluta < 0 ºC
- HURS: humedad relativa a 2 metros. Es el promedio (mensual o anual) del dato diario (%)
- PRCPTOT: (Annual total wet-day precipitation). Precipitación total anual en los días húmedos (RR>=1mm) (mm)

- R20 número de días con precipitaciones mayores o iguales a 20 mm.
- R95P Percentil 95 de los días con precipitaciones superiores a 1mm.
- RX 1day Máximo mensual de la precipitación diaria.
- TN05 Percentil 5 anual de la temperatura mínima diaria.
- TNMM Media mensual de la temperatura mínima diaria.
- TR Número de noches tropicales (temperatura mínima>20 ºC)
- TX95 Percentil 95 anual de la temperatura máxima diaria.
- TXMM Media mensual de la temperatura máxima diaria.
- WSS 10 meter wind speed. Media mensual de la velocidad media diaria del viento a 10 metros.
- WSSMAX 10 meter wind speed without gust. Máximo mensual de la velocidad media diaria del viento a 10 metros.

VARIABLES CLIMÁTICAS

Como podemos ver en Figura 2 la todas las proyecciones arrojan un calentamiento continúo durante la primera mitad del siglo XXI, pero con tendencia a incrementarse en las últimos años. Este calentamiento sería más acentuado que en la última mitad del siglo XX, mientras que parece indicar que atendiendo a la temperatura media total, el calentamiento sería ligeramente más pronunciado en los meses de invierno.

Figura 2 Evolución de las temperaturas medias totales en España



Viendo la Figura 3Figura 4Figura 5 donde se ha realizado la media de todos los modelos, podemos ver como evolucionaría el calentamiento de forma regional. Claramente se observa como el calentamiento no es homogéneo, sino que presenta ciertas asimetrías, siendo mayor en las zonas interiores, más concretamente en la meseta sur peninsular y en algunas zonas de montaña y menor en las zonas costeras, especialmente en la cornisa cantábrica.

Figura 3. Temperaturas medias en escenario base (1951-2000)

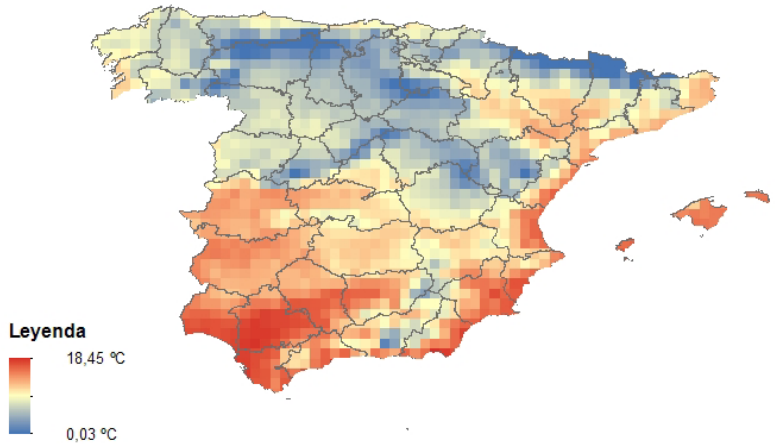


Figura 4. Proyección de temperaturas medias en 2041-2050

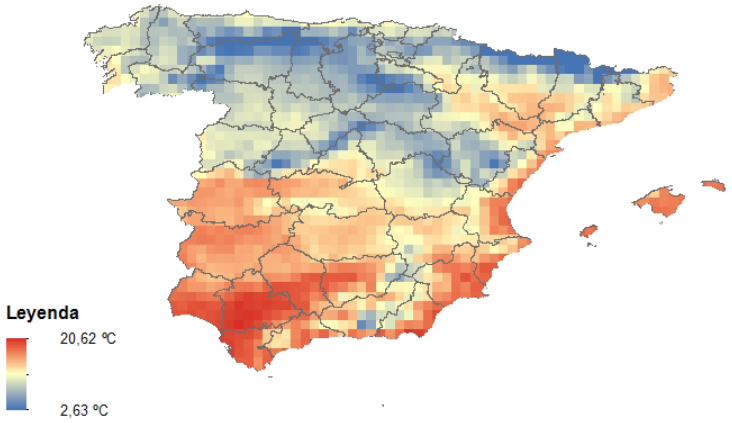
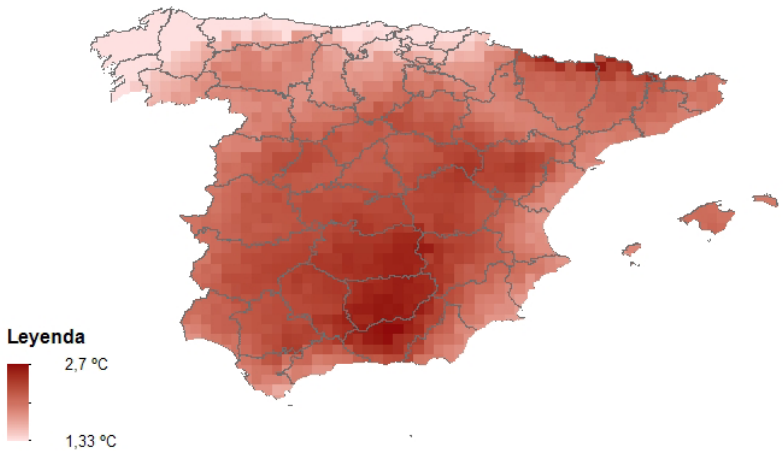


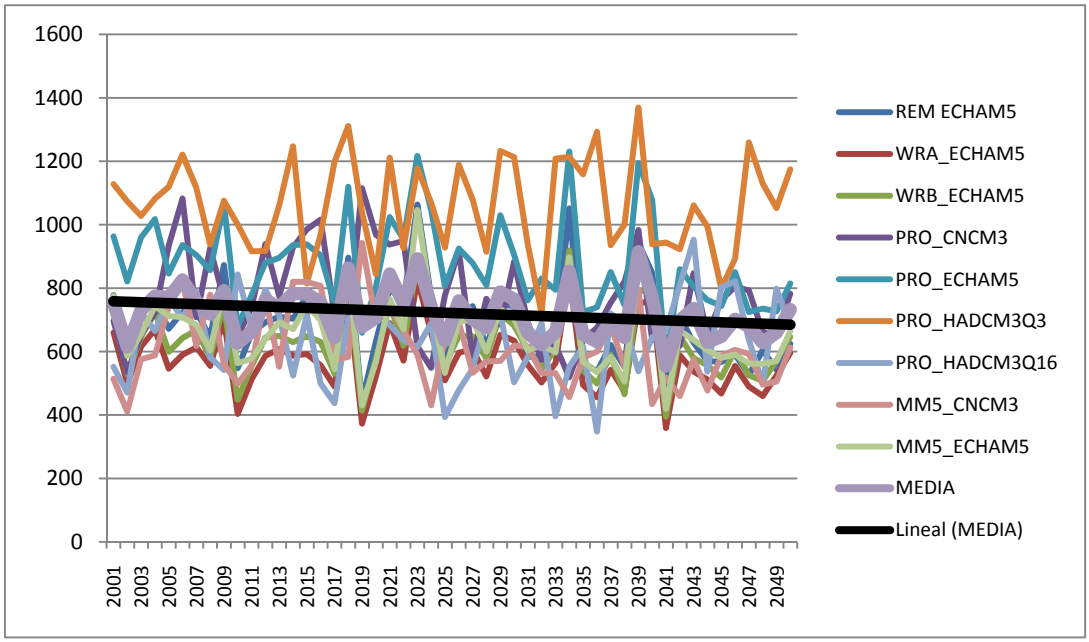
Figura 5. Incremento de temperaturas entre escenario base y la proyección de 2041-2050



En cuanto a las precipitaciones, en la Figura 6, donde de manera gráfica podemos observar la evolución de las precipitaciones para todas las proyecciones, así como la

media y la línea de tendencia de la media. En él se puede ver que aunque de forma irregular, la tendencia media en España es a un descenso de las precipitaciones, más si lo comparamos con el escenario base donde desde 1951 hasta 2000, no se puede observar una tendencia muy significativa a la baja. Al igual que en las temperaturas el comportamiento general viene a empeorar en los últimos años de la serie.

Figura 6. Evolución de las precipitaciones anuales en mm.



Si nos detenemos a observar el comportamiento regional de las precipitaciones en las Figura 7, Figura 8Figura 9, también observamos cierta asimetría en cuanto a la evolución de las precipitaciones, aunque todas a la baja. Observamos una mayor caída en la mitad sur occidental de hasta casi el 30% en el valle del Guadalquivir y al menor también en el valle del Ebro, mientras que en Galicia y las zonas más montañosas del norte peninsular la caída serían bastante menor, entre el 5%.

Figura 7. Precipitaciones medias anuales en el escenario base

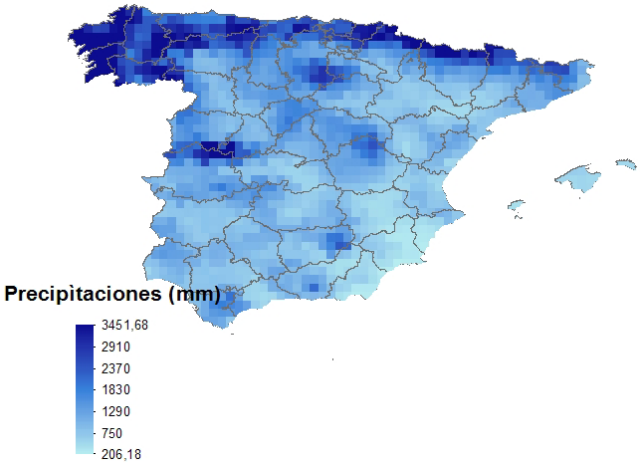


Figura 8 Precipitaciones medias anuales en la proyección de 2041-2050

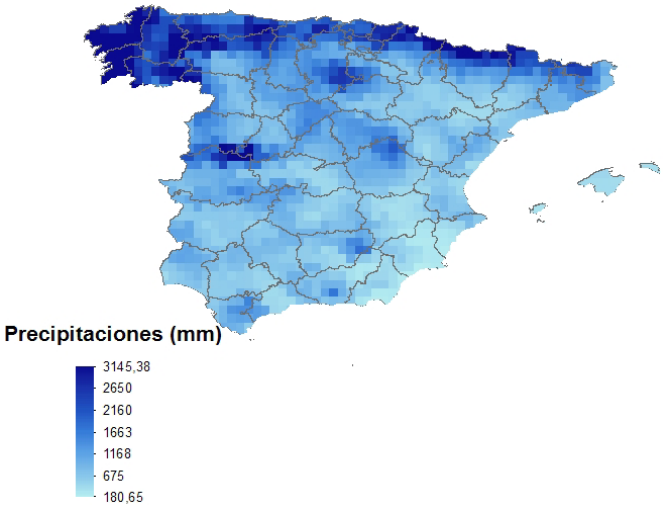
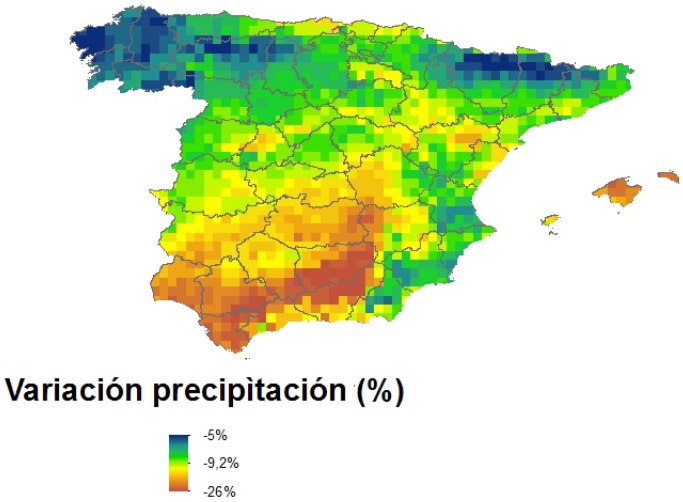


Figura 9. Variación de las precipitaciones medias anuales entre escenario base y la proyección de 1041-2050



Un detalle a tener en cuenta en el caso de las precipitaciones es el volumen medio diario de estas, ya que nos dará más información sobre los posibles daños que podría ocasionar sobre la erosión de los suelos y de posibles daños a los cultivos en forma de lluvias torrenciales e inundaciones. Podemos encontrar un resumen detallado de la evolución de la cantidad diaria de precipitaciones en el anexo 1, pero todas las proyecciones parecen indicar un aumento de la cantidad diaria de precipitaciones mayores de 150 mm, mayormente en los decenios que abarcan desde 2011 a 2030. Dicho de otro modo todas las proyecciones parecen indicarnos un descenso de las precipitaciones, pero un incremento de la intensidad de estas, lo que puede ocasionar un incremento de los periodos de sequía junto con un aumento de las lluvias torrenciales y de inundaciones.

ÍNDICES CLIMÁTICOS

Se han seleccionado los índices que forman parte del el sistema de clasificación climática multicriterio de Geoviticultura Climático (GMCC en sus siglas en inglés), un sistema de clasificación climática de regiones vitícolas sobre la base de la integración de las diferentes clases de los tres índices climáticos (DI, HI y CI) que establece el clima de cada región vitícola y permite a las regiones clasificarse y agruparse (Tonietto y Carbonneau 2004).

Con estos datos se zonificará para toda la superficie utilizando diversos índices característicos para la viticultura.

ÍNDICE HELIOTÉRMICO DE HUGLIN

Como hemos visto la fenología de la vid puede ser trazada como la suma de las temperaturas activas, lo que ha permitido la división en zonas que representan bastante bien diversas calidades de la uva y algunas de las características del vino como resultado de la influencia climática. Así el índice de Huglin muestra una buena relación entre las zonas con el potencial de contenido de azúcar de la uva, por lo que es muy útil a la hora de llegar a una correcta clasificación. Los valores del Índice que dan lugar a seis clases de clima se pueden ver en la Tabla 4.

El índice de Huglin (Huglin 1978) se corresponde con la fórmula:

$$\mathrm{HI} = \sum_{1\ \mathrm{abril}}^{30\ \mathrm{sept}} \frac{[(\mathrm{T_{media}} - 10) + (\mathrm{T_{max}} - 10)]}{2} * \mathrm{d}$$

Ya que con este índice sólo se pretende estudiar el ciclo activo de la vid, sólo se tienen en cuenta las temperaturas que van desde el 1 de abril hasta el 30 de septiembre. Para la temperatura media hemos calculado con la media mensual de las temperaturas máximas y mínimas, más concretamente con la media mensual de la temperatura mínima diaria, y con la media mensual de la temperatura máxima diaria.

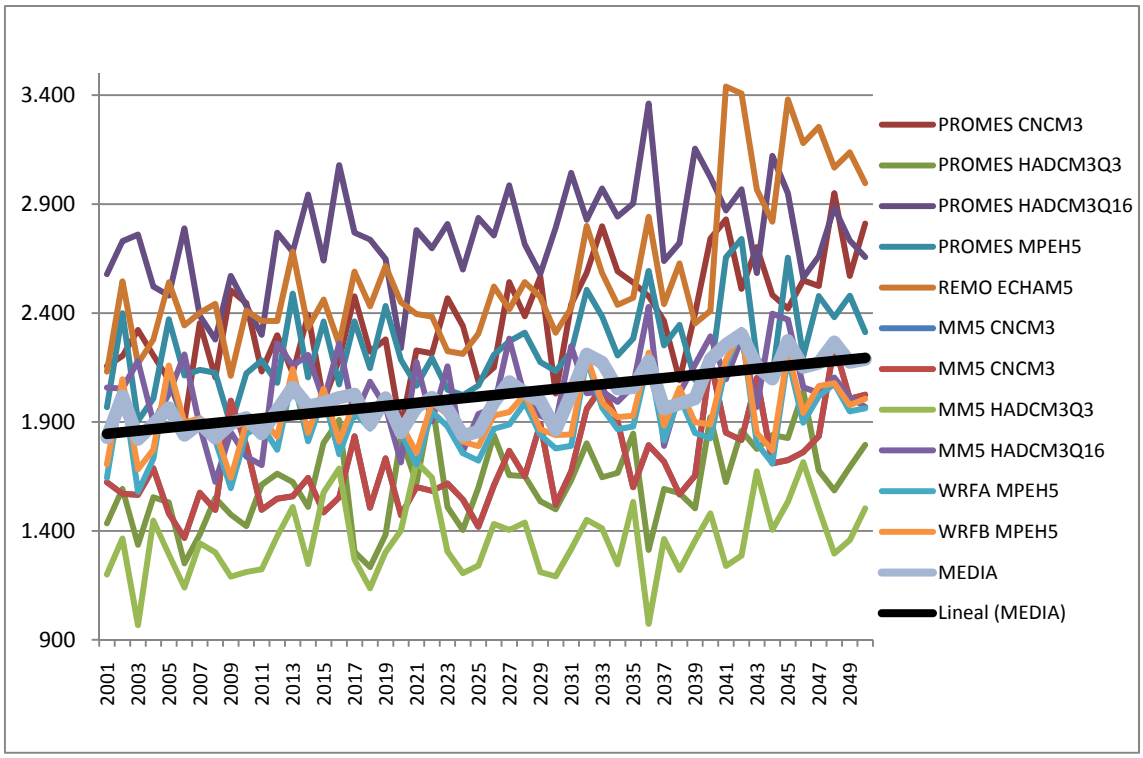
La d es un coeficiente de corrección para tener en cuenta el período de luz diurna media de la latitud estudiada. En el caso de España este coeficiente consideramos que se corresponde con un valor de 1,02.

El índice de Huglin depende de las temperaturas y el comportamiento sigue un comportamiento parecido al que ya vimos en el caso de las temperaturas (ver Figura 2). Tanto la media como todas las proyecciones siguen una tendencia de crecimiento durante todo el periodo de estudio (2001-2050), con un ratio de mayor que durante el periodo base o de referencia (1951-2000). En la Figura 10 se puede observar de manera gráfica la evolución de cada una de las proyecciones, así como la media y la línea de tendencia de la media.

Tabla 4 Clasificación según índice de Huglin (Huglin 1978)

Índice	Nombre de la clase	Abreviación	Intervalos
Huglin Index (HI)	Muy cálido	HI+3	HI > 3000
	Cálido	HI+2	2400 < HI ≤ 3000
	Templado cálido	HI+1	2100 < HI ≤ 2400
	Templado	HI-1	1800 < HI ≤ 2100
	Fresco	HI-2	1500 < HI ≤ 1800
	Muy fresco	HI-3	HI ≤ 1500

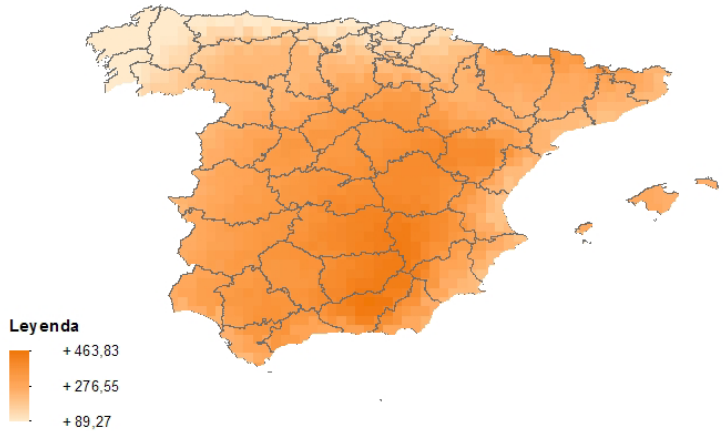
Figura 10. Evolución de la media anual del índice de Huglin para toda España para todas las proyecciones



Al igual que en los casos anteriores esta tendencia no es homogénea ni en el tiempo ni en el espacio. Se puede observar como la tendencia se incrementa a lo largo del tiempo, incrementándose de manera clara a partir de la década de los 30. En cuanto al espacio como se puede observar en la Figura 11, podemos observar cómo se produce un incremento mayor en las zonas interiores de la península, más aún en las zonas

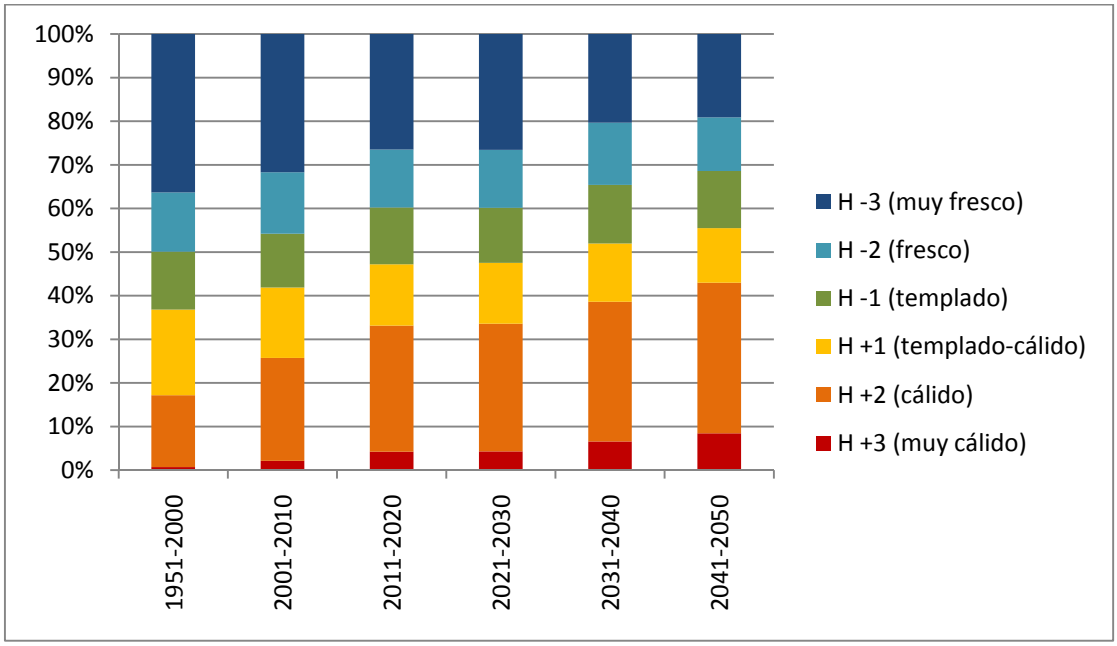
orientales de la meseta y en las zonas centrales del Pirineo, que alcanzan incrementos de hasta casi 500 grados/días. Por el contrario las zonas próximas al mar de la cornisa cantábrica y Galicia serían las que menos incrementos tendrían con valore próximos a los 500 ^{o}C/días, mientras que la cuenca mediterránea y el valle del Ebrose situarían en un punto intermedio con incrementos entorno a los 200-250 ^{o}C /días algo por debajo de los de la meseta occidental.

Figura 11 Crecimiento del Índice de Huglin desde el escenario base hasta la proyección de la década 2011-2020 (en ^{o}C)



La consecuencia de este calentamiento puede observarse en la Figura 12, donde se ve claramente como la superficie de las zonas más cálidas según el índice van aumentando a costa de las más frías, incrementándose a un mayor ritmo a partir del la década de los 30, tras una estabilización entre 2011 y 2030. Éste gráfico se ha realizado a partir de las medias de las proyecciones, no obstante en el anexo 2, se puede ver el comportamiento para cada una de las proyecciones individualmente.

Figura 12 Evolución de la superficie según la clasificación del índice heliotérmico de Huglin



En las figuras Figura 13Figura 14Figura 15Figura 16Figura 17, podemos ver mejor esta evolución geográfica, como las partes más cálidas, que se corresponden con la mitad sur peninsular van paulatinamente cambiando el clima más cálido según esta clasificación, alcanzando para 2050 prácticamente todo el valle del Guadalquivir, el valle del Guadiana en Badajoz, el valle del Tajo entrando ya en Toledo además de Murcia y Alicante. En general esta situación se repite en las demás cuencas de los ríos aunque sin llegar al clima más cálido, a medida que transcurren los años los climas más cálidos van ascendiendo por los valles, llegando los cambios en la clasificación hasta la parte alta de los valles: Rioja-Álava en el Ebro, Burgos y Soria en el Duero y Orense-Lugo en la cuenca del Miño-Sil. También se producen cambios en zonas costeras siendo más claros en la zona costera de Pontevedra, Cataluña y Valencia en toda su franja costera, así como en las Islas Baleares, donde los climas más cálidos van ascendiendo en altitud paulatinamente.

Figura 13 Indice de Huglin en el escenario base (1951-2000)

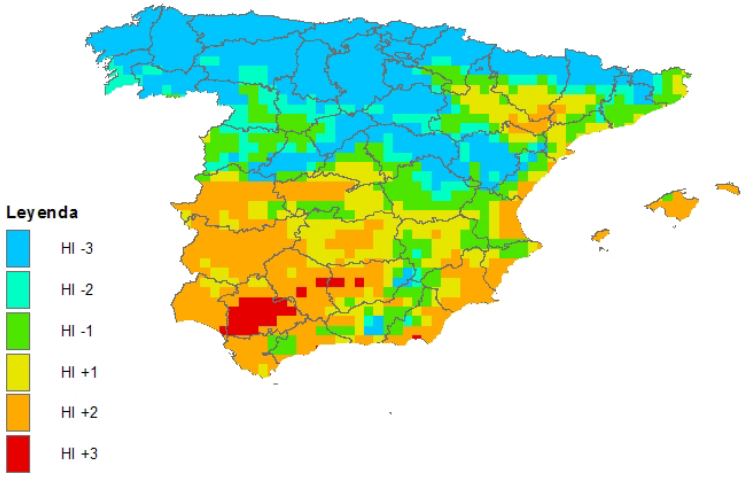


Figura 14 Proyección del Índice de Huglin en la década 2011-2020

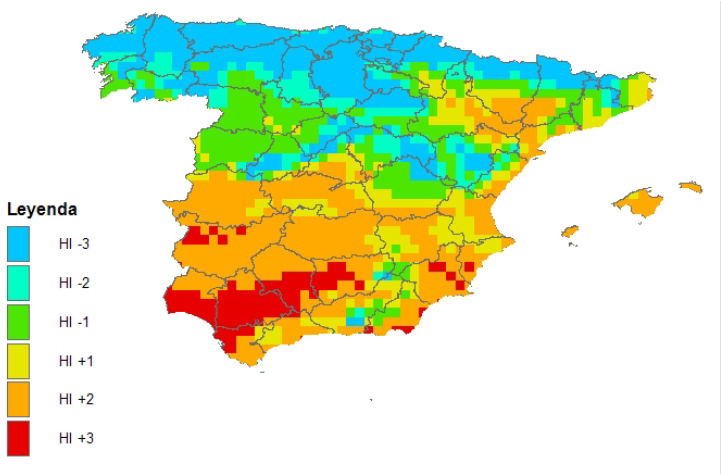


Figura 15 Proyección del Índice de Huglin en la década 2021-2030

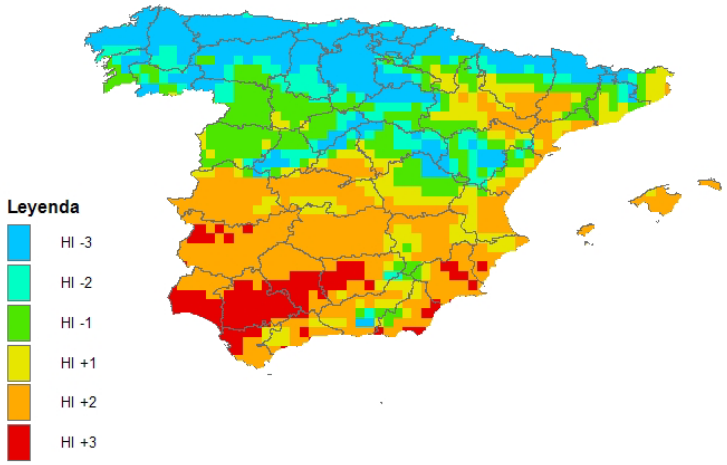


Figura 16 Proyección del Índice de Huglin en la década 2031-2040

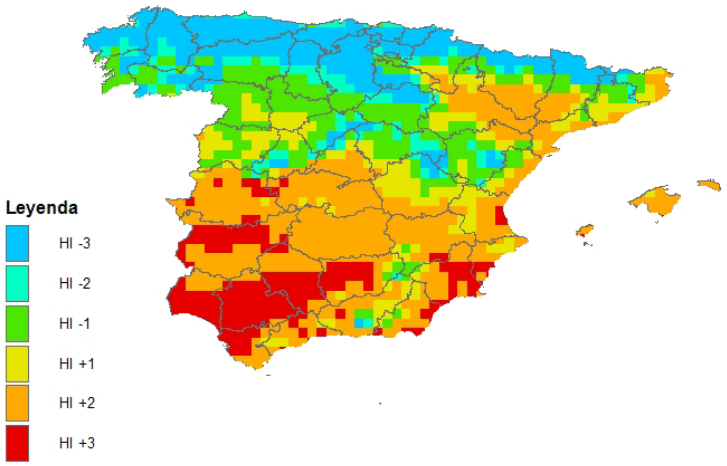
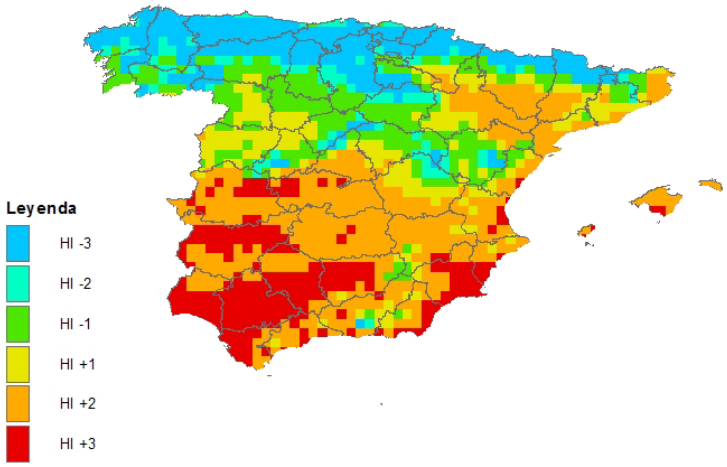


Figura 17 Proyección del Índice de Huglin en la década 2041-2050



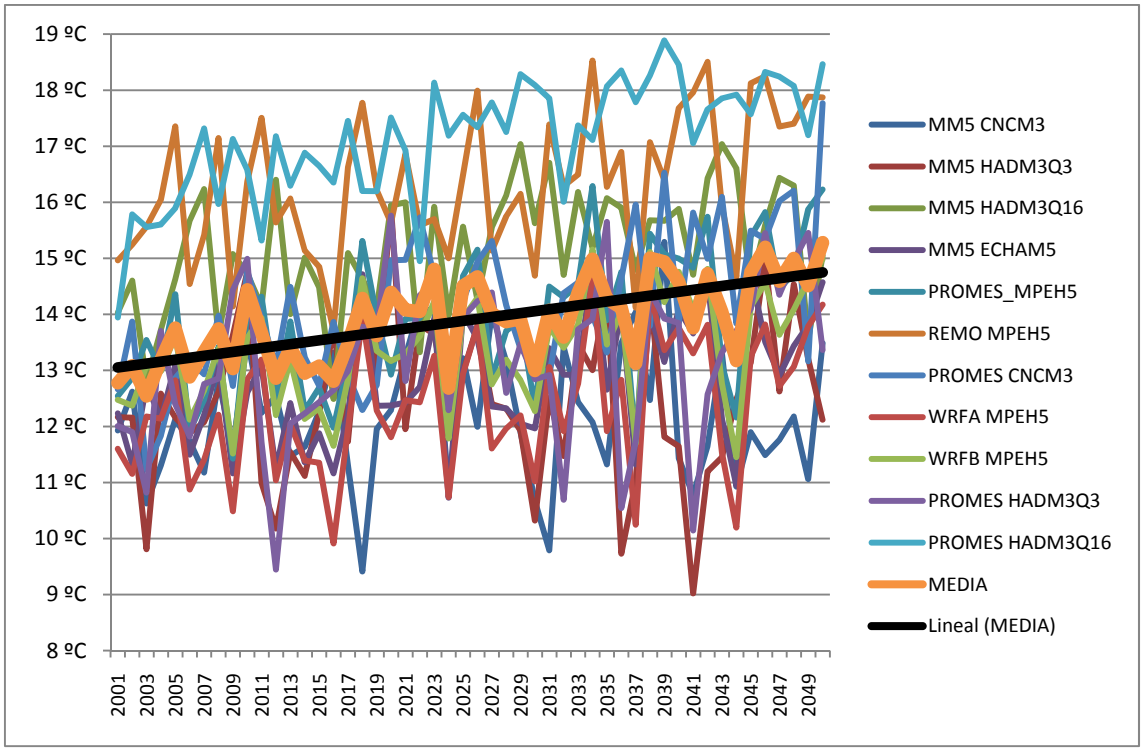
ÍNDICE DE FRESCOR NOCTURNO

Con este índice se pretende poner de relieve la importancia de las diferencias de temperatura entre noche y día para la maduración. Como vimos en la Tabla 3, es muy importante para una buena calidad contar en el periodo de maduración con días cálidos que favorezcan la maduración con noches frías que impidan que esta se acelere demasiado y permita un buen equilibrio en los componentes de la uva.

Para el cálculo del índice de frescor nocturno (Tonietto y Carbonneau 2004) sólo se tiene en cuenta las temperaturas mínimas de las medias nocturnas durante el mes habitual de la maduración anterior a la vendimia. En nuestro caso se correspondería con los valores de la Temperatura media mínima del mes de septiembre.

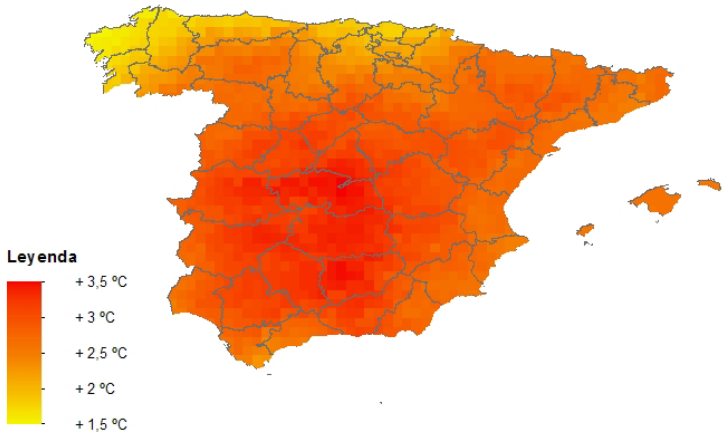
La evolución al alza de la media para toda España puede verse en la Figura 18, donde se puede apreciar también un incremento de hasta cerca 2 ^{o}C. Esta vez la tendencia parece continua desde el inicio del periodo de estudio (2001-2050)

Figura 18 Evolución del índice de frescor nocturnos según las proyecciones de ESCENA



Un análisis geográfico de la evolución de temperaturas mínimas del mes de septiembre, que se puede observar en la Figura 19, nos permite identificar las zonas donde se produciría mayores incrementos. Estas temperaturas mínimas se verían incrementadas en mayor medida en las zonas interiores de la península, especialmente en la mitad sur occidental en provincias de Toledo, Ciudad Real, Córdoba y Extremadura, donde podrían alcanzar los 3,5 ^{o}C. El incremento de temperaturas sería menor a medida que subimos en latitud o nos acercamos a la costa, siendo de apenas 1,5 en la cornisa cantábrica.

Figura 19 Incremento de la temperaturas mínimas del mes de septiembre desde escenario base (1951-2000) y la proyección media de 2041-2050.



Con la clasificación de este índice, que se puede observar en la según la temperatura media mínima del mes de septiembre, podemos cuantificar como sería la evolución de estas zonas a lo largo de los años.

Tabla 5 clasificación climática del índice de frescor nocturno

Índice	Nombre de la clase	Abreviación	Intervalos
Frescor nocturno (cool index)	Muy fresco	CI+2	CI ≤ 12
	Fresco	CI+1	12 < CI ≤ 14
	Templada	CI-1	14 < CI ≤ 18
	Templado-cálido	CI-2	CI > 18

Así, en la Figura 20, podemos ver como las zonas con noches más frías van disminuyendo a lo largo de los años, siendo sustituidas por otras más cálidas con una tendencia constante. Como en el caso del índice anterior en el anexo 3, podremos encontrar un análisis más detallado del comportamiento de las zonas según los diferentes modelos y proyecciones.

Al hacer un análisis geográfico de la clasificación climática (ver Figura 21Figura 22Figura 23Figura 24Figura 25), podemos ver como las zonas más frías quedan restringidas a las zonas montañosas del Sistema Central, Ibérico, Pirineos y la Cordillera Cantábrica con algún punto en el bético, mientras que las zonas más calurosas van ascendiendo desde la costa por los valles. A mediados de siglo quedarían como zonas con noches cálidas prácticamente todo el valle del Guadalquivir y las zonas más costeras del arco mediterráneo, mientras que contarían con noches templadas todas las zonas costeras y la cuenca media de los ríos Ebro, Duero y Guadiana. Mientras el valle del Duero, la parte mdeia del Miño-Sil y la Rioja, Álava, parte de Navarra aunque con noches más álidas seguirían con noche frescas.

Figura 20 Evolución en porcentaje de las zonas climáticas establecidas según el índice de frescor nocturno

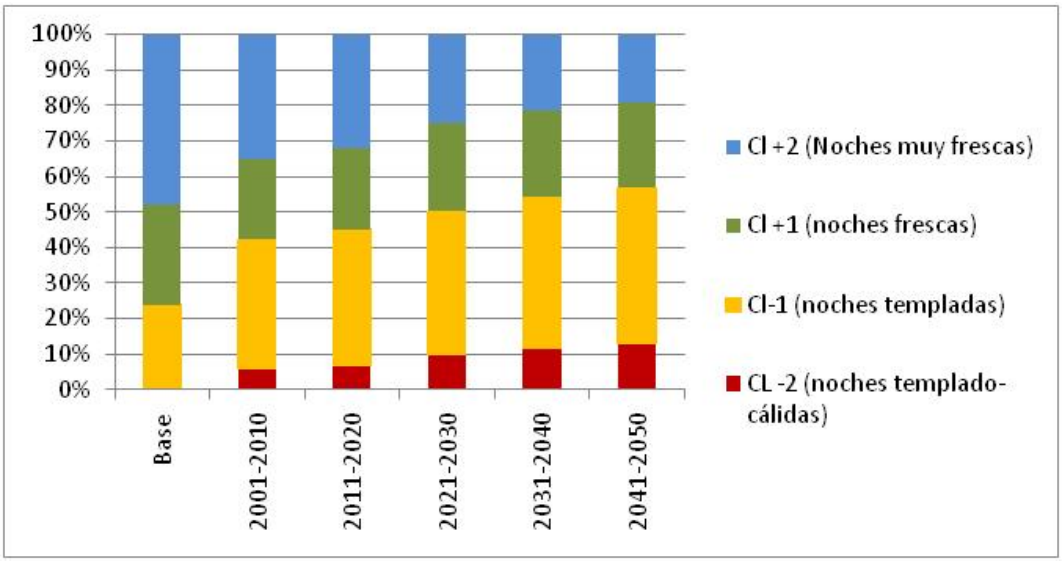


Figura 21 Clasificación climática según el índice de frescor nocturno en el escenario base (1951-2000)

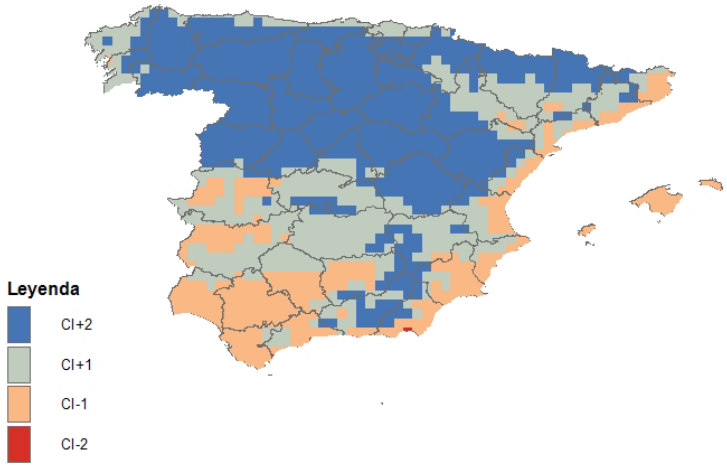


Figura 22 Clasificación climática según el índice de frescor nocturno en la proyección de 2011-2020

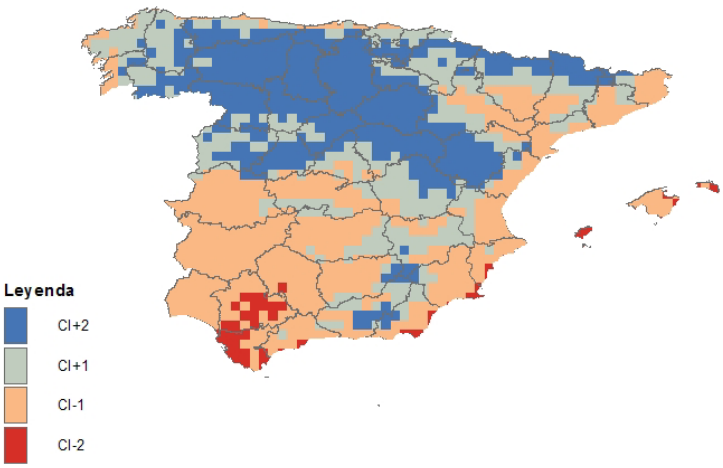


Figura 23 Clasificación climática según el índice de frescor nocturna en la proyección de 2021-2030

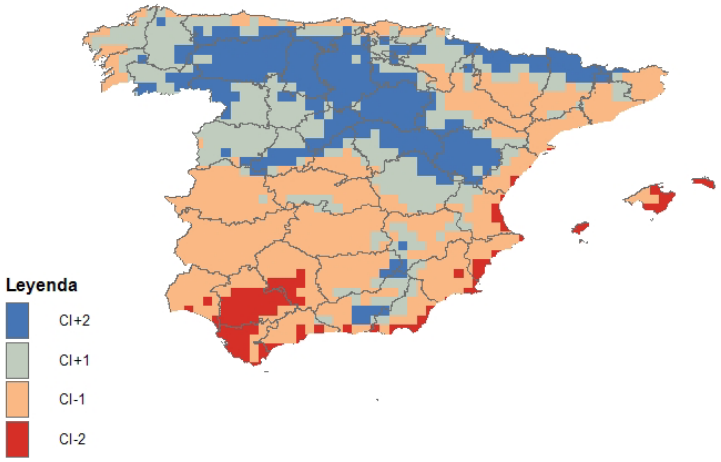


Figura 24 Clasificación climática según el índice de frescor nocturno en la proyección de 2031-2040

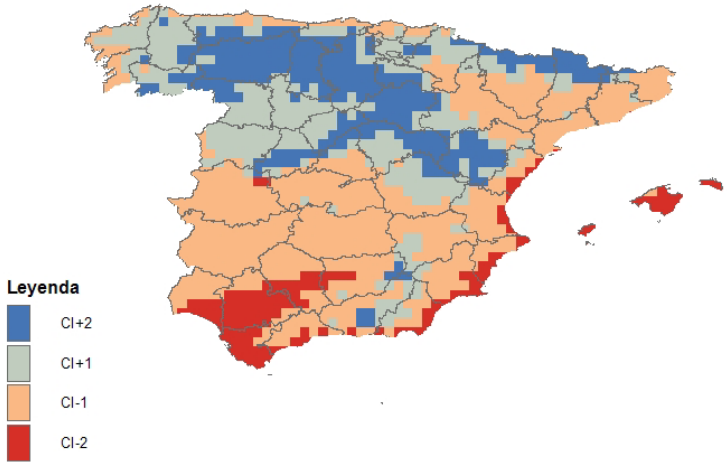
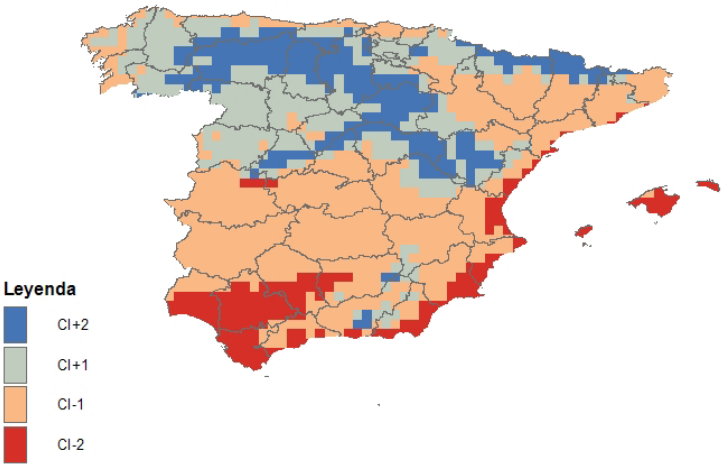


Figura 25 Clasificación climática según el índice de frescor nocturno en la proyección de 2041-2050



INDICE DE SEQUÍA

El índice de sequía (Tonietto y Carbonneau 2004) es una adaptación del índice de potencial hídrico del suelo de Riou (Riou, Becker, y otros 1994). El IS es calculado sobre un período de seis meses; en el hemisferio norte se inicia el 1 de Abril y finaliza el 30 de Septiembre, según la siguiente fórmula:

$$\mathrm{IS} = \mathrm{Wo} + \mathrm{P} - \mathrm{Tv} - \mathrm{Es}$$

Donde:

W= Estimación de la reserva hídrica del suelo al final de un período dado, en mm.

Wo= Reserva hídrica inicial útil del suelo explotable por las raíces, en mm.

P= Lluvia, en mm.

Tv= Transpiración potencial del viñedo Tv = ETP x k donde K es el coeficiente de absorción de la radiación por la viña (relacionado con la transpiración y depende de la arquitectura foliar). Los valores de k adoptados serían el hemisferio norte, K=0,1 para el mes de abril, 0,3 para mayo y 0,5 para los meses de junio a septiembre.

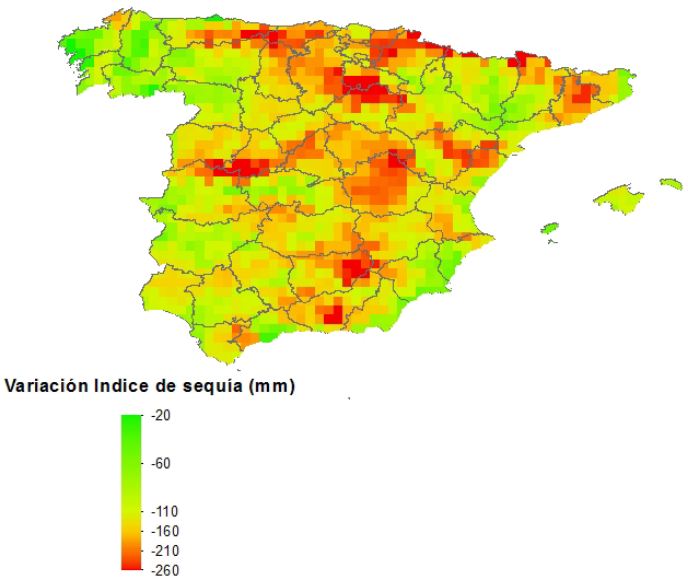
Es= Evaporación directa del suelo y se calcula mediante la fórmula Es= ETP/N*(1-k)*JPm

JPm= número de días del mes en que la evaporación del suelo es efectiva (JPm=lluvia del mes en mm/5; JPM debe ser >= número de días

N= número de días del mes

ETP= Evaporación Potencial (total mensual) que se calcula siguiendo la metodología definida en el anexo 4.

Figura 26 Reducción del índice de sequía entre escenario base y la proyección 2041-2050



Como ya vimos en el análisis de las precipitaciones, el descenso homogéneo de las precipitaciones anticipaba un aumento de las condiciones de sequía en toda la superficie. Pero analizando los resultados de la Figura 26, podemos ver que donde más variación se produciría sería en las zonas montañosas, donde la reducción de las precipitaciones se combinaría con un aumento de la evapotranspiración, haciendo que en las zonas más bajas los efectos de la sequía serían menores.

En cuanto a la variación de la distribución de superficie de las clases de zonas que establece el índice de sequía, que se puede consultar en la Tabla 6 adaptada a las condiciones más secas de la península ibérica.

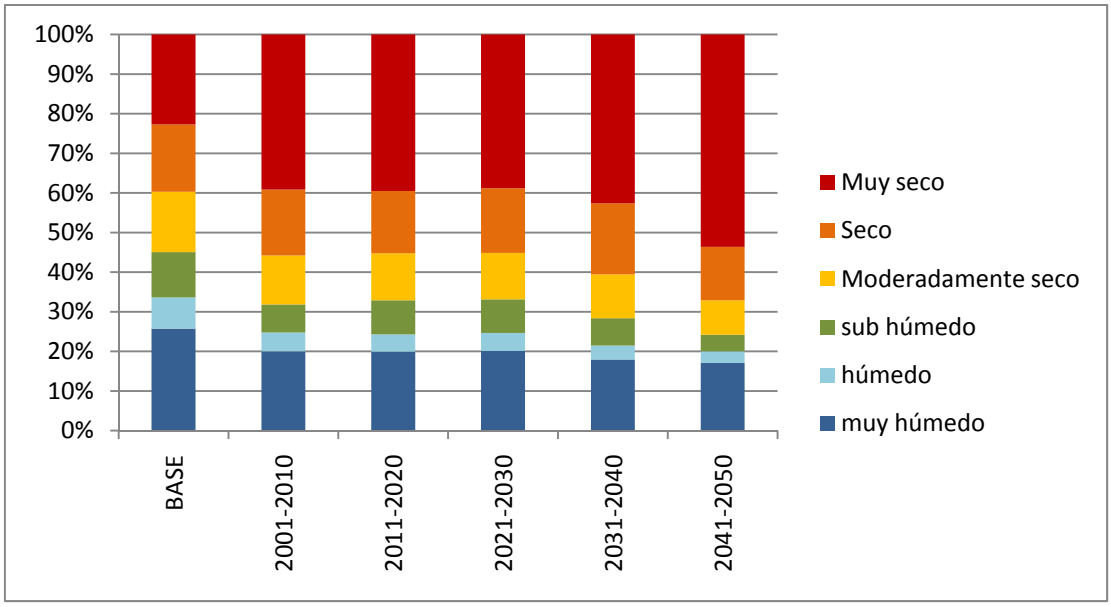
Tabla 6 Clasificación según índice de sequía

Índice	Nombre de la clase	Abreviación	Intervalos
Índice de sequía (drought index)	Muy seco	DI+3	DI ≤-100
	Seco	DI+2	-100 < DI≤ -50
	Moderadamente seco	DI+1	-50< DI≤ 0
	sub húmedo	DI-1	0< DI≤ 50
	húmedo	DI-2	50 < DI ≤100
	muy húmedo	DI-3	DI > 100

La evolución de este índice por clases de clima puede observarse en la Figura 27 Evolución de las clases de clima según el índice de sequía para las medias de las proyecciones donde se indica la distribución de las clases de clima según el índice de sequía para las medias de las proyecciones desde el escenario base (1941-2000) hasta 2050.

Como podemos observar las consecuencias del aumento de la temperatura con el descenso de las precipitaciones tendrá consecuencias que se empezarán a notar más a partir de la década de los 30, aunque si bien estas ya si bien esto ya se ha producido si observamos la tendencia dentro de los años de referencia y en las primeras proyecciones de los modelos. También en este caso en el anexo 5 se pueden consultar los resultados por escenario.

Figura 27 Evolución de las clases de clima según el índice de sequía para las medias de las proyecciones



Si vemos analizamos la evolución de clasificación por climática geográficamente podemos ver como las zonas más secas van aumentando a medida que pasan los años llegando todo el sur peninsular y las partes más bajas del valle del Ebro a clasificarse como muy secar para el 2050. Incluso gran parte del valle del Duero entraría dentro de la clasificación de secas o muy secas.

Figura 28 Clasificación geográfica por zonas según índice de sequía para el escenario base (1951-2000)

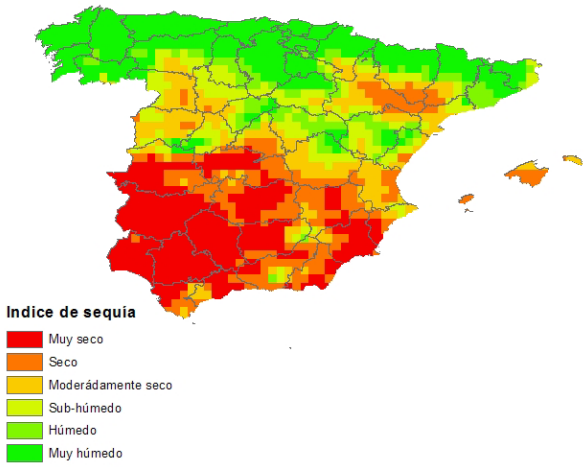


Figura 29 Clasificación geográfica por zonas según índice de sequía para la proyección 2011-2020

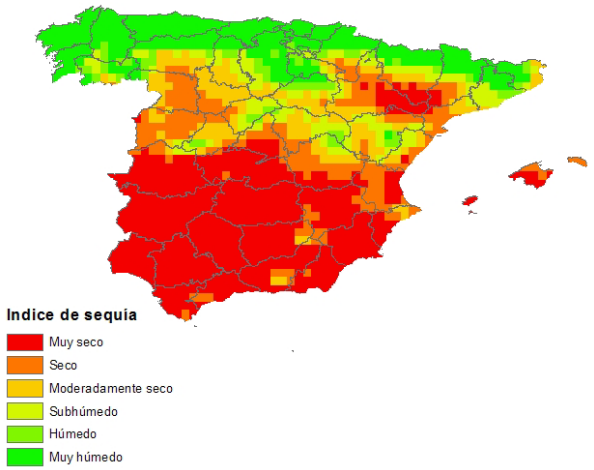


Figura 30 Clasificación geográfica por zonas según índice de sequía para la proyección 2021-30

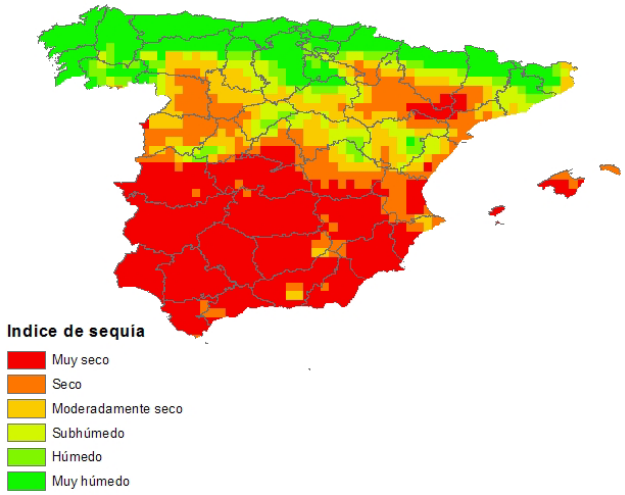


Figura 31 Clasificación geográfica por zonas según índice de sequía para la proyección 2031-40

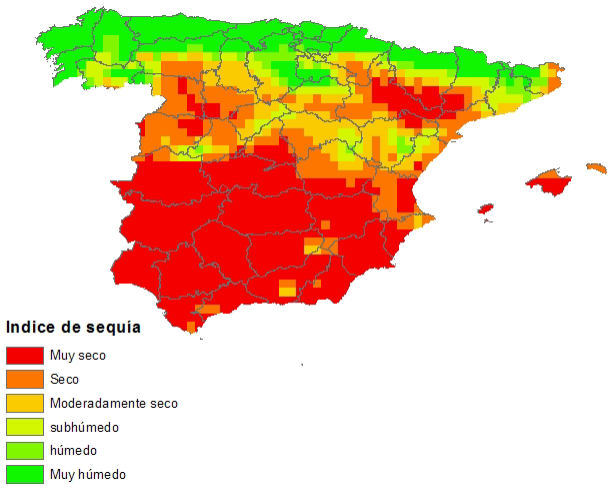
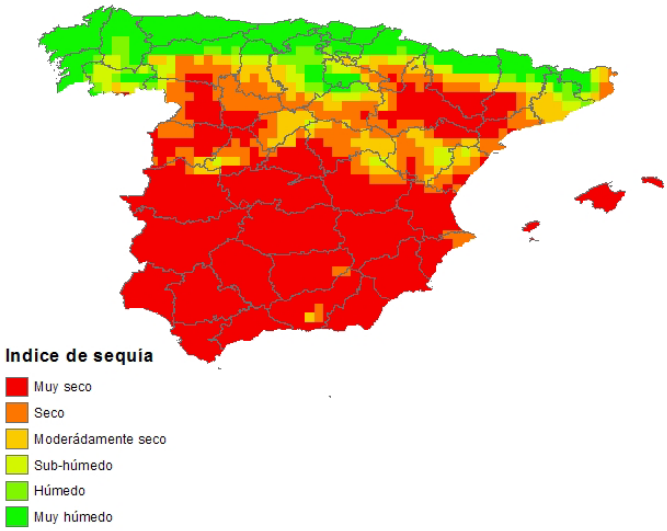


Figura 32 Clasificación geográfica por zonas según índice de sequía para la proyección 2041-50



CONCLUSIONES

El cambio climático se presenta como uno de los mayores retos al que el viñedo se enfrenta en los próximos años. Aunque los cambios ya son evidentes si nos atenemos a los estudios climatológicos de las series de los últimos años, las proyecciones regionalizadas de los modelos climáticos globales que se vienen realizando en los recientemente parecen indicar que estos cambios se pueden acelerar en las próximas décadas si no se produce un cambio rápido en el modelo de crecimiento que redujese las emisiones de gases de efecto invernadero.

Estas proyecciones indican que si las emisiones de gases de efecto invernadero continúan al ritmo actual, podría darse en la Península Ibérica un aumento de las temperaturas y un descenso de las precipitaciones. Esto unido también a un aumento de su intensidad diaria aumentaría los riesgos de siniestros en primer lugar por lluvias torrenciales e inundaciones, a problemas de erosión y por último de sequías e incendios por el descenso de la humedad. No obstante la intensidad de estos cambios no sería homogénea, sino que variaría debido a la compleja topografía y situación geográfica de la Península Ibérica, como tampoco lo serían sus efectos.

Por todo ello, cuando intentamos describir el impacto del Cambio Climático en un cultivo como el viñedo, no se podría hablar de efectos únicos para toda España, ya que no sólo las condiciones de partida son diferentes para cada una de las zonas, sino que los cambios se producirán de forma única en cada uno de ellos.

El incremento de las temperaturas en principio podría ocasionar un alargamiento del ciclo activo de la planta y una reducción del riesgo de heladas, lo que podría mejorar el rendimiento medio e incluso la calidad de la uva en aquellas zonas donde fuese habitual una alta acidez por falta de maduración. No obstante si éste fuese excesivo,

aunque la viña no se considera que tenga un umbral de temperaturas máxima, para las variedades presentes en las zonas de cultivo podría acortar la duración del periodo de crecimiento, haciendo que la vid pase a través de sus eventos fenológicos más rápidamente (G. V. Jones 2007), y en concreto la duración de la maduración. Este hecho tendría efectos negativos en la calidad (Bindi, Fibbi y Gozzini 1996), al ocasionar un exceso de madurez y de azúcares en la uva. Particularmente también unas temperaturas mínimas excesivamente altas durante el periodo de maduración podrían perjudicar este proceso.

Esta información junto con el estudio del comportamiento los principales índices de zonificación vitivinícola permiten anticipar posibles riesgos de cara a los próximos años.

Los climas más cálidos actualmente para el viñedo se encuentran en el sur peninsular, en los valles del Tajo, Guadiana y sobre todo Guadalquivir y costa del sudeste, y son precisamente en estas zonas del sur peninsular las que afrontarían los mayores retos. El calentamiento global haría que paulatinamente estos climas más calurosos asciendan en altitud extendiéndose hacia el interior, donde además se experimentaría un mayor incremento de temperaturas a medida que la influencia marítima es menor. Esto, además de crear desfases entre el ciclo de las variedades y el clima e incrementar las posibilidades de que se encuentren desequilibrios en la composición uva a causa de una mala maduración, dejaría dentro del clima más cálido de Huglin gran parte de las zonas productoras del sur y oeste peninsular, lo que limitaría tanto las variedades, como la calidad de los vinos resultantes.

Estos cambios también se producirían en otras zonas productoras, como el valle del Duero, valle del Ebro, Galicia y Cataluña, es decir calentamientos más intensos en las zonas más interiores y una extensión de climas más cálidos hacia el interior, si bien las condiciones de partida son diferentes ya que cuentan con temperaturas más frías a lo largo del ciclo y además la intensidad del incremento sería menor, sobre todo en aquellas zonas con influencia más atlántica. Esto hará que, aunque también habrá calentamiento, en el norte de la Península los impactos en la viticultura sean más irregulares, pudiendo llegar a ser beneficiosos en las zonas más frías por la disminución de las heladas, y dependa mucho en una misma zona del tipo de variedad y del microclima del viñedo. En principio se podría afirmar que las posibilidades de adaptación en el norte peninsular están más abiertas ya que la intensidad del cambio sería menor.

Si bien los mayores descensos de las precipitaciones se darían en suroeste de la península con cerca de un 30% para 2050, se esperan años más secos con una distribución más irregular en toda la Península en mayor o menor medida. El descenso de las precipitaciones, junto con una mayor intensidad de éstas, incrementaría el número de sequías y su intensidad, lo que aumentaría la competencia por los cada vez más escasos recursos hídricos.

En cuanto a las necesidades hídricas, se espera un gran incremento de estás por el aumento de la evapotranspiración y al descenso de las precipitaciones. Aunque en algunas zonas el descenso de la humedad puede disminuir el riesgo de ataques de enfermedades, en general puede suponer un gran problema a la hora de asegurar las

necesidades hídricas mínimas del cultivo en los años más secos. Según las proyecciones climáticas se esperaría un incremento de los climas muy secos por todo el sur peninsular y por las cuencas baja y media de los ríos Duero y Ebro, esto incrementaría las necesidades hídricas del viñedo en estas zonas más aún si no se usan prácticas de cultivo que minimicen la evapotranspiración.

BIBLIOGRAFÍA

AchutaRao, K., y otros. *An Appraisal of Coupled Climate Model Simulations.* United States: Lawrence Livermore National Laboratory UCRL-TR-202550, 2004.

AEMET. *Agencia Estatal de Meteorología.* www.aemet.es (último acceso: 2 de junio de 2012).

Allen, Richard G., Luis S. Pereira, Dirk Raes, y Martin Smith. *Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos.* FAO. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación, Roma: FAO. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación, 2006.

Amerine, M. A., y A. J. Winkler. «Composition and quality musts and wines of California grapes.» *Hilgard 15*, 1944: 493–673.

Benito, G. *Impactos sobre los riesgos naturales: riesgo de crecidas en Informe sobre Evaluación Preliminar de los Impactos en España por Efecto del Cambio Climático en Informe sobre Evaluación Preliminar de los Impactos en España por Efecto del Cambio Climático.* Madrid: Secretaría General Técnica. Ministerio de Medio Ambiente, 2005.

Bindi, M., L. Fibbi, y B. Gozzini. «Modelling the impact of future climate scenarios on yield and yield variability of grapevine.» *Clim Res Vol. 7*, 1996: 213-224.

Bindi, M., L. Fibbi, y F. Miglietta. «Free Air CO2 Enrichment (FACE) of grapevine (Vitisvinifera L.): II. Growth and quality of grape and wine in response to elevated CO2 concentrations.» *European Journal of Agronomy 14*, 2001 a: 145-155.

Brunet, M., y otros. *Generación de escenarios regionalizados de cambio climático para España.* Madrid: Ministerio de Medio Ambiente Medio Rural y Marino, 2009.

Carbonneau, A. «Irrigation, vignoble et produits de la vigne.» En *Traité d'irrigation, Aspects qualitatifs*, 257–276. Paris: Lavoisier, 1998.

Castro, M, J. Martıín-Vide, y S. Alonso. «El clima de España: pasado, presente y escenarios de clima para el siglo XXI.» En *Evaluación Preliminar de los Impactos en España por Efecto del Cambio Climático*, de J. M. Moreno, 1-64. Madrid: Ministerio de Medio Ambiente, 2005.

Coipel, J., B. Rodriguez-Lovelle, C. Sipp, y C. van Leeuwen. «« Terroir » effect, as a result of environmental stress, depends more on soil depth than on soil type (Vitis vinifera L. cv. Grenache noir, Côtes du Rhône, France,2000).» *J. Int. Sci. Vigne Vin. 40, n°4,*, 2006: 177-185.

Domínguez, M., y otros. «Present climate precipitation and temperature extremes over Spain from a set of high resolution RCMs.» *Climate research*, 2011.

Duteau, J., M. Guilloux, y G. Seguin. «Influence des facteurs naturels sur la maturation du raisin, en 1979, à Pomerol et Saint-Emilion.» *Connaissances dela Vigne et du Vin 15*, 1981: 1-27.

Estevan, María Luz Rodrigo. «Claves de la expansión vitivinícola en el período medieval hispano: Aragón, siglos XII-XV.» *Revista Universum* Vol.1, nº Nº 22 (2007): 72-93.

Fernández, J., y otros. «Escenarios-PNACC 2012: Resultados de regionalización dinámica.» *8º Congreso Internacional AEC 2012. Oral contribution.* Salamanca: Publicaciones de la Asociación Española de Climatología (AEC), 2012.

Forster, P., y otros. *IPCC: Climate Change, 2007, The Physical basis , The Physical Science Basis. WGI Contribution to the FourthWGI Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* United Kingdom and New York, NY, USA.: Cambridge University Press, Cambridge,, 2007.

Fregoni, C., y S. Pezzutto. «Principes et premières approaches de l'indice bioclimatique de qualité de Fregoni.» *Progr. Agric. Vitic. 18*, 2000: 390–396.

Frías, M., J. Gutiérrez, y F. Méndez. «Future regional projections of extreme temperatures in Europe: a nonstationary seasonal approach Journal Name: Climatic Change.» *Climatic Change*, 2012: 371-392.

Giorgi, F., y L. O. Mearns. «Approaches to the simulation of regional climate change: A review".» *Rev. Geophys 29 DOI:10.1029/90RG02636.*, 1991: pp:191–216.

Goncalves, B., V. Falco, J. Moutinho-Pereira, E. Bacelar, F. Peixoto, y C. Correia. «Effects of elevated CO2 on grapevine (Vitis vinifera L.): Volatile composition, phenolic content, and in vitro antioxidant activity of red wine.» *Journal of Agricultural and Food Chemistry 57*, 2009: 265-273.

Hidalgo, Luis. *Tratado de viticultura general.* Madrid: Mundi-Prensa, 2002.

Huglin, P. «Nouveau mode d'évaluation des possibilités héliothermiques d'un milieu viticole.» *Comptes Rendus de l'Académie de l'Agriculture de France 64*, 1978: 1117-1126.

IPCC, 2007. «Summary for Policymakers.» En *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, de S., D. Qin, M. Manning, Z. enhen, M. Marquis, K.B. Averyt, M.Tignor and H.L. Miller Solomon, 1-18. Cambridge, United Kingdom and New York, USA: Cambridge University Press, 2007.

Jackson, D. I., y P. B. Lombard. «Environmental and management practices affecting grape composition and wine quality: a review.» *Am. J. Enol. Vitic. 4*, 1993: 409–430.

Jiménez-Guerrero, P., y otros. «Description of mean fields and interannual variability in an ensemble of RCM evaluation simulations over results from the ESCENA project.» *Climate Research*, 2012: enviado.

Jones, G V. «Relationships between grapevine phenology, composition, and quality for Bordeaux, France.» *Arbor Phaenol 2*, 1999: 3–7.

Jones, G. V. «Climate change and the global wine industry.» *Proceedings from the 13th Australian Wine Industry Technical Conference.* Adelaide, Australia, 2007.

Jones, G. V., M. A. White, O. R. Cooper, y K. Storchmann. «Climate change and global wine quality.» *Climate Change 73*, 2005: 319–343.

Kenny, G. J., y P. A. Harrison. «The effects of climate variability and change on grape suitability in Europe.» *J. Wine Res., 3*, 1992: 163–183.

Kimball B.A., Mauney J.R., Nakayama F.S., ldso S.B. «Effects of increasing atmospheric CO2.» *Planta ecology 104/105*, 1993: 65-74.

Kliewer, W. M., y R. E. Torres. «Effect of controlled day and night temperatures on grape coloration.» *Am. J. Enol.Vitic. 2*, 1972: 71–77.

Kliewer, W.M. « Berry composition of Vitis vinifera cultivars as influenced by photo and nycto-temperatures during maturation.» *J. Am. Soc. Hort. Sci. 2*, 1973: 153–159.

Matthews, M., y M. Anderson. «Fruit ripening in Vitis vinifera L.:responses to seasonal water deficits.» *Am. J. Enol. Vitic., 39*, 1988: 313-320.

MEC, Ministerio de Economía y Competitividad. *Datacomex.Estadísticas de Comercio Exterior.* 10 de Noviembre de 2012. http://datacomex.comercio.es/ (último acceso: 10 de Noviembre de 2012).

Meehl, G. A., y otros. «Global Climate Projections.» En *Climate Change 2007: The Physic Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, de S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds Solomon, 589-662. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.: Cambridge University Press,, 2007.

Mérouge, I., G. Seguin, y D. Arrouays. «Les sols et l'alimentation hydrique de la vigne à Pomerol: état hydrique et croissance de la vigne en 1995.» *J. Int. Sci. Vigne Vin 32 (2)*, 1998: 59–68.

Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino. *Anuario de Estadística Agroalimentaria y Pesquera.* Madrid: Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino, 2007.

Moreno Rodríguez, José Manuel. *Evaluación Preliminar de los Impactos en España por Efecto del Cambio Climático.* Madrid: Secretaría General Técnica. Ministerio de Medio Ambiente, 2005.

Moutinho-Pereira, J., B. Goncalves, y E. Bacelar. «Effect of elevated CO2 on grapevine (Vitis vinifera L.): physiological and yield attributes.» *Vitis, 48*, 2009: 159-165.

Mullins, M. G., A. Bouquet, y L. E. Williams. *Biology of the grapevine.* Cambridge: Cambridge University Press, 1992.

Myneni, R. B., C. D. Keeling, C. J. Tucker, y G Asrar. «Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981 to 1991 .» *Nature, 386*, 1997: 698-702.

Nikulin, G., E. Kjellstrom, U. Hansson, G. Strandberg, y A. Ullerstig. «Evaluation and future projections of temperature, precipitation and wind extremes over Europe in an ensemble of regional climate simulations.» *TELLUS SERIES A-DYNAMIC METEOROLOGY AND OCEANOGRAPHY 63(1)*, 2011: 41–55.

Oficina Española de cambio climático. «Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático.» *B.O.E Núm. 236. D. L.: M-1/1958 - ISSN: 0212-033X*, 2006: 103274-103071.

Pan, Z., J.H. Christensen, R. W. Arritt, W. J. Gutowski Jr., E. S. Takle, y F. Otieno. «J. Evaluation of uncertainties in regional climate change simulations.» *Geophys. Res., 106(D16), 17,735–17,751, doi:10.1029/2001JD900193.*, 2001.

Riou, Ch., y otros. *Le déterminisme climatique de la maturation du raisin: application au zonage de la teneur em sucre dans la communauté européenne.* Luxembourg: Office des Publications Officielles des Communautés Européennes, 1994.

Rogers H.H., Dahlman R.C. «Crop responses to CO2 enrichment.» *Plant ecology, 104/105*, 1993: 117-131.

Santos, J. A., A. c. Malheiro, J. G. Pinto, y G. V. Jones. «Macroclimate and viticultural zoning in Europe: observed trends and atmospheric forcing.» *Clim. Res.51*, 2012: 89-103.

Santos, J. A., S. D. Grätsch, M. K. Karremann, G. V. Jones, y J. G. Pinto. «Ensemble projections for wine production in the Douro Valley of Portugal.» *Climatic Change*, 2012.

Schultz, H.R. «Climate change and viticulture: a European perspective on climatology, carbon dioxide and UV-B effects.» *Aus.t J. Grape Wine Res. 6*, 2000: 2–12.

Seguin, G. «Influence des terroirs viticoles sur la constitution et la qualité des vendanges.» *Bull. O.I.V. 623*, 1983 : 3–18.

Seguin, G., y I. G. de Cortazar. «Climate warming: consequences for viticulture and the notion of 'terroirs' in Europe.» *Acta Hortic 689*, 2005: 61–71.

Singleton, V. L., y P. Esau. «Phenolic substances in grapes and wine, and their significance.» *Adv. Food Res. Supp. 1,*, 1969: 112–133.

Sotés, V. «Comportamiento fisiológico de la vid en climas cálidos y en particular durante el período de maduración de la uva.» *1º Workshop Internacional de Pesquisa: A Produção de Vinhos em Regiões Tropicais.* Recife e Petrolina, PE, Brasil, 2004.

Tomana, T., N Utsunomiya, y I. Dataoka. «The effect of environmental temperatures on fruit on ripening on the tree. II. The effect of temperatures around whole vines and clusters on the coloration of 'Kyoho'grapes.» *J. Jap. Soc. Hort. Sci. 48*, 1979: 261–265.

Tonietto, J., y A. Carbonneau. «A multicriteria climatic classification system for grape-growing regions worldwide.» *Agricultural Forest Meteorology, 124*, 2004: 81-97.

Trégoat, O., C. van Leeuwen, X. Choné, y J. P. Gaudillère. «Etude du régime hydrique et de la nutrition azotée de la vigne par des indicateurs physiologiques. Influence sur le comportement de la vigne et la maturation du raisin.» *International Journal of Vine and Wine Sciences, 36,*, 2002: 133-142.

Unwin, Tim. *El vino y la viña.* Barcelona: Editorial -tusquets, 2001.

van der Linden, P., y J. F.B. Mitchell. *ENSEMBLES: Climate Change and its Impacts: Summary of research and results from the ENSEMBLES project.* Exeter EX1 3PB, UK: Met Office Hadley Centre, FitzRoy Road,, 2009.

van Leeuwen, C., P. H. Friant, X. Fhone, O. Tregoat, S. Koundouras, y D. Dubourdieu. «The influence of climate, soil and cultivar on terroir.» *Am.J. Enol. Vitic., 55, 3,*, 2004: 207-217.

van Leeuwen, C., y G. Seguin. «Incidences de l'alimentation en eau de la vigne, appréciée par l'état hydrique du feuillage, sur le développement de l'appareil végétatif et la maturation du raisin (Vitis vinifera variété Cabernet franc, Saint-Emilion, 1990).» *J. Int. Sci. Vigne Vin. 28, 2,*, 1994: 81–110.

van Leeuwen, C., y G. Seguin. «The Concept of Terroir in Viticulture.» *Journal of Wine Research, Vol. 17, No. 1,*, 2006: 1-10.

Vaudour, E. *Les terroirs viticoles. Définitions, caractérisation et protection.* Paris: Dunod, 2003.

Vaudour, E., R. Morlat, C van Leeuwen, y A. F. Delédec. «Terroirs viticoles et sols.» En *Sols et Environnement*, de M.C., Walter, C., Rémy, J.C., Berthelin, J., Morel, J.L. Girard, 105-126. Paris: Dunod, 2005.

White, R.E. *Soils for fine wines.* New York: Oxford University Press, 2003.

Winkler, A., J. Cook, W. Kliewer, y L. Lider. *General viticulture.* Berkeley: University of California press, 1974.

Winkler, A.J. *General Viticulture.* Berkeley: University of California, 1962.

Xavier, Choné, Cornelis van Leeuwen, Denis Dubourd, y Jean Pierre Gaudillère. «Stem Water Potential is a Sensitive Indicator of Grapevine Water Status.» *Ann Bot 87:*, 2001: 477-483.

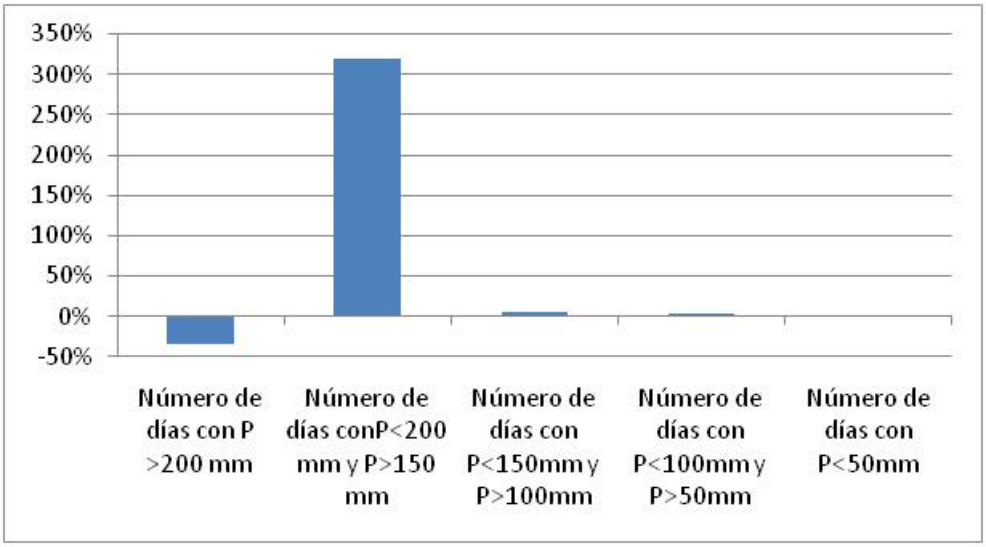
ANEXO 1. EVOLUCIÓN DE LA CANTIDAD DIARIA DE LAS PRECIPITACIONES

En este apartado podremos ver como cada una de las proyecciones indica un incremento del volumen diario de las precipitaciones. En las tablas podremos observar la evolución por decenio desde 1951 hasta 2050 de los días con lluvia, agrupados según volumen de precipitaciones en todas la orografía española, en 1445 divisiones de 20 Km de lado.

En los gráficos podemos observar la evolución desde el escenario base (1951-2000) hasta la proyección total (2001-2050)

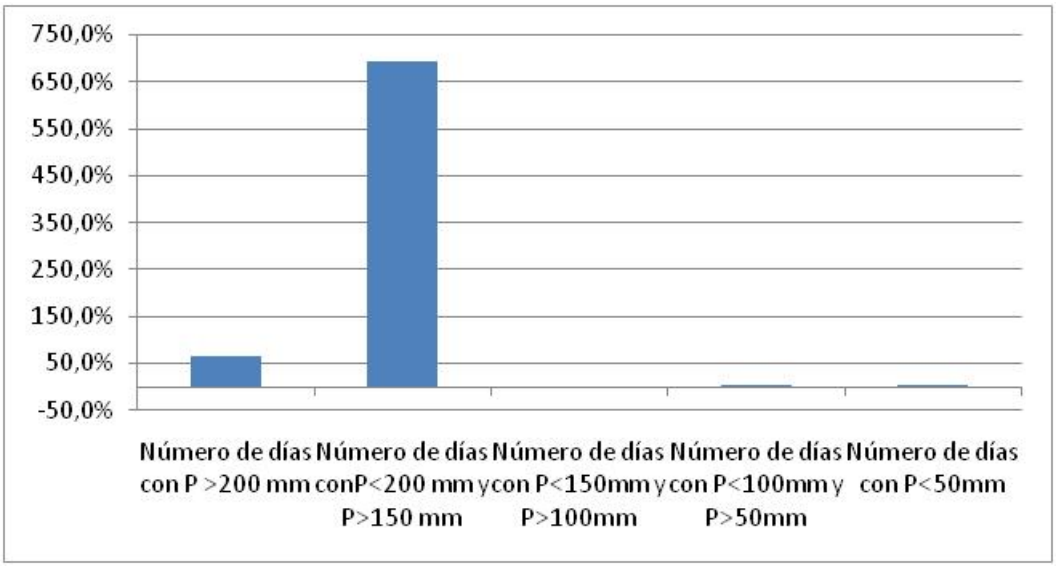
PROYECCIÓN REMO ECHAM 5

	días con P >200 mm	días con P<200 mm y P>150 mm	días con P<150mm y P>100mm	días con P<100mm y P>50mm	días con P<50mm
1951-1960	9	67	518	7.239	165.579
1961-1970	25	55	490	7.225	165.605
1971-1980	37	116	673	7.376	164.898
1981-1990	54	104	799	8.063	173.346
1991-2000	7	68	709	8.128	147.148
2001-2010	8	51	640	8.161	164.540
2011-2020	25	702	702	7.504	165.072
2021-2030	27	760	760	9.197	163.291
2031-2040	23	121	740	7.575	164.941
2041-2050	4	84	515	6.914	165.883



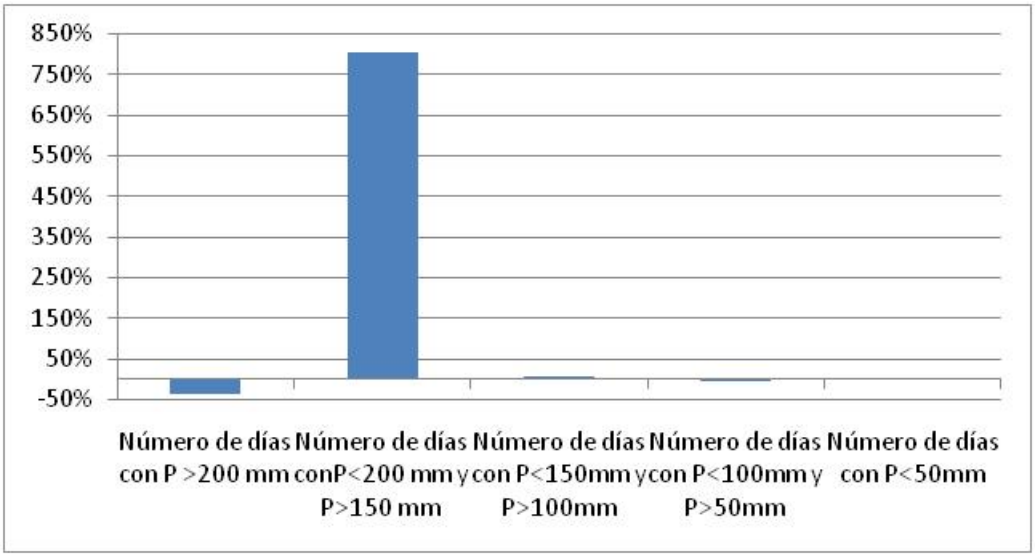
PROYECCIÓN WRF A ECHAM 5

	días con P >200 mm	días con P<200 mm y P>150 mm	días con P<150mm y P>100mm	días con P<100mm y P>50mm	días con P<50mm
1951-1960	0	7	194	3.556	169.683
1961-1970	7	20	218	4.110	169.045
1971-1980	2	16	264	4.076	168.952
1981-1990	2	28	329	4.833	173.398
1991-2000	0	15	226	3.939	151.880
2001-2010	0	10	179	3.968	169.243
2011-2020	0	220	220	3.670	169.490
2021-2030	0	363	363	5.131	167.895
2031-2040	18	44	195	4.351	168.792
2041-2050	0	45	263	3.499	169.593



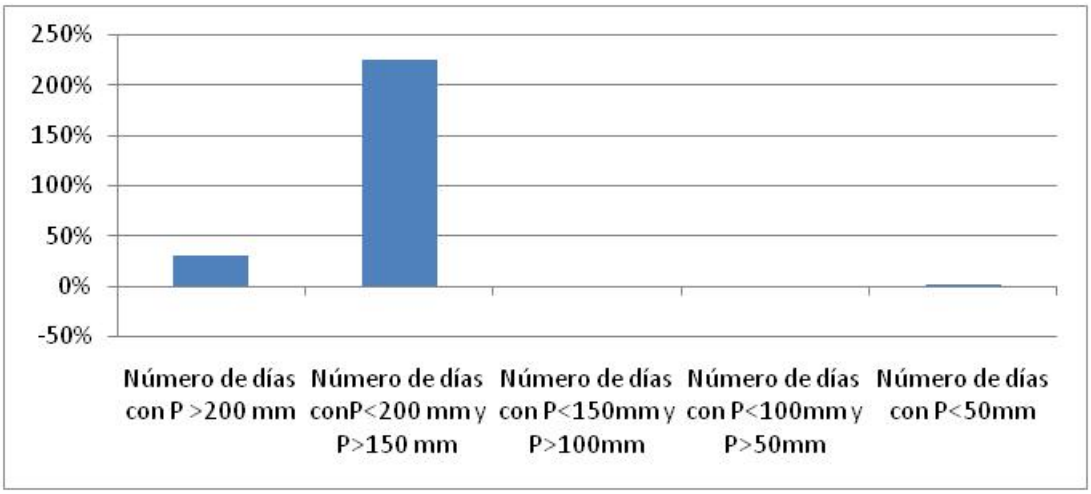
PROYECCIÓN WRF B ECHAM 5

	días con P >200 mm	días con P<200 mm y P>150 mm	días con P<150mm y P>100mm	días con P<100mm y P>50mm	días con P<50mm
1951-1960	1	19	287	4.859	168.265
1961-1970	0	22	205	5.181	167.992
1971-1980	1	20	315	5.330	167.616
1981-1990	9	22	457	6.182	173.391
1991-2000	0	18	312	4.957	150.773
2001-2010	0	22	284	5.213	167.881
2011-2020	0	311	311	4.600	168.468
2021-2030	0	465	465	6.068	166.826
2031-2040	0	37	293	5.211	167.859
2041-2050	7	79	308	4.488	168.518



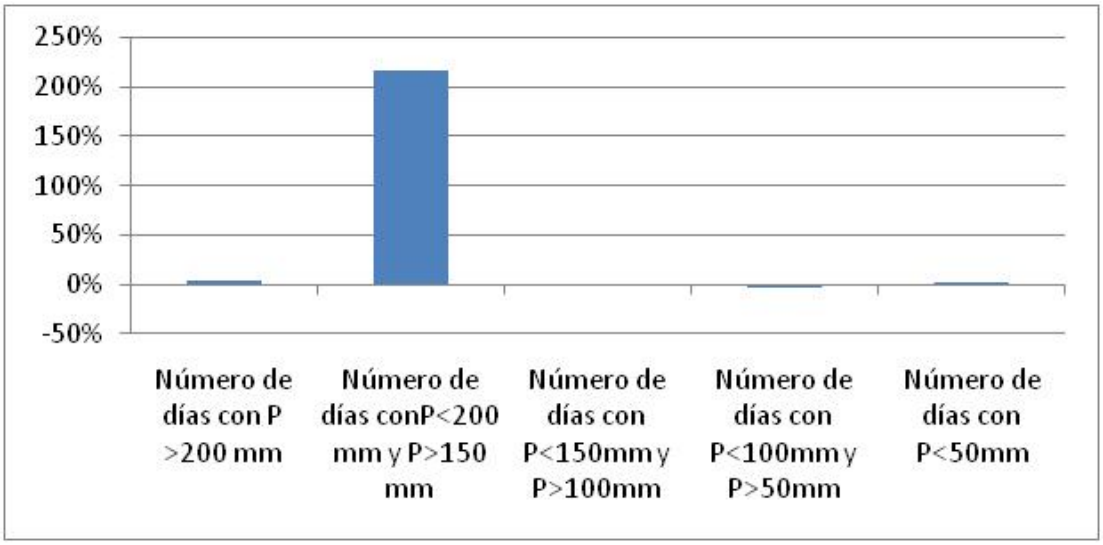
PROYECCIÓN PROMES CNCM3

	días con P >200 mm	días con P<200 mm y P>150 mm	días con P<150mm y P>100mm	días con P<100mm y P>50mm	días con P<50mm
1951-1960	8	102	814	6.905	165.597
1961-1970	26	171	1.079	7.833	164.291
1971-1980	13	101	939	7.162	164.971
1981-1990	47	152	888	7.322	173.353
1991-2000	48	201	1.062	7.377	147.372
2001-2010	49	168	847	6.549	165.787
2011-2020	34	964	964	7.337	164.900
2021-2030	30	915	915	7.340	164.981
2031-2040	57	171	975	6.884	165.313
2041-2050	16	145	1.027	7.811	164.401



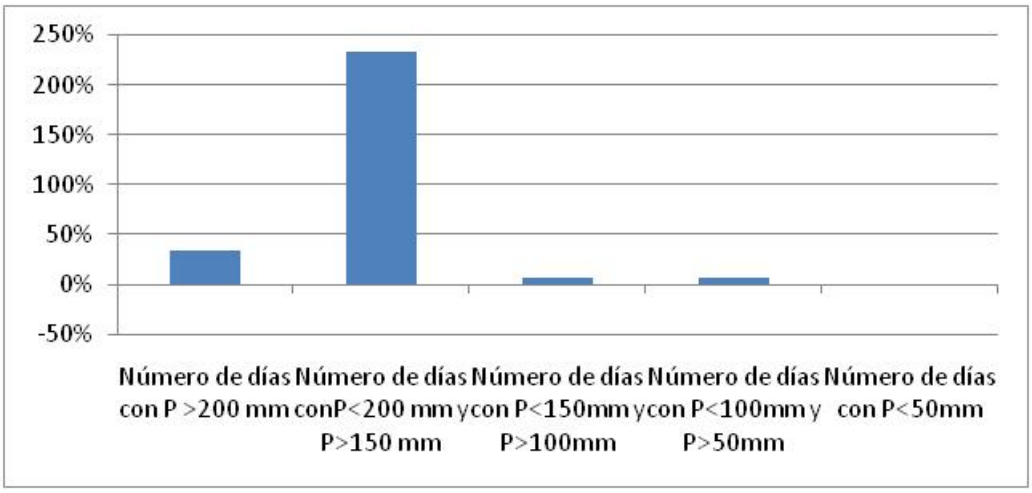
PROYECCIÓN PROMES ECHAM 5

	días con P >200 mm	días con P<200 mm y P>150 mm	días con P<150mm y P>100mm	días con P<100mm y P>50mm	días con P<50mm
1951-1960	81	242	1.238	10.830	161.117
1961-1970	26	152	1.052	11.438	160.732
1971-1980	34	228	1.440	10.986	160.803
1981-1990	66	240	1.546	12.314	173.334
1991-2000	22	203	1.331	12.030	142.474
2001-2010	39	148	1.284	11.294	160.635
2011-2020	61	1.118	1.118	10.265	161.743
2021-2030	77	1.692	1.692	13.215	158.061
2031-2040	41	207	1.314	11.513	160.325



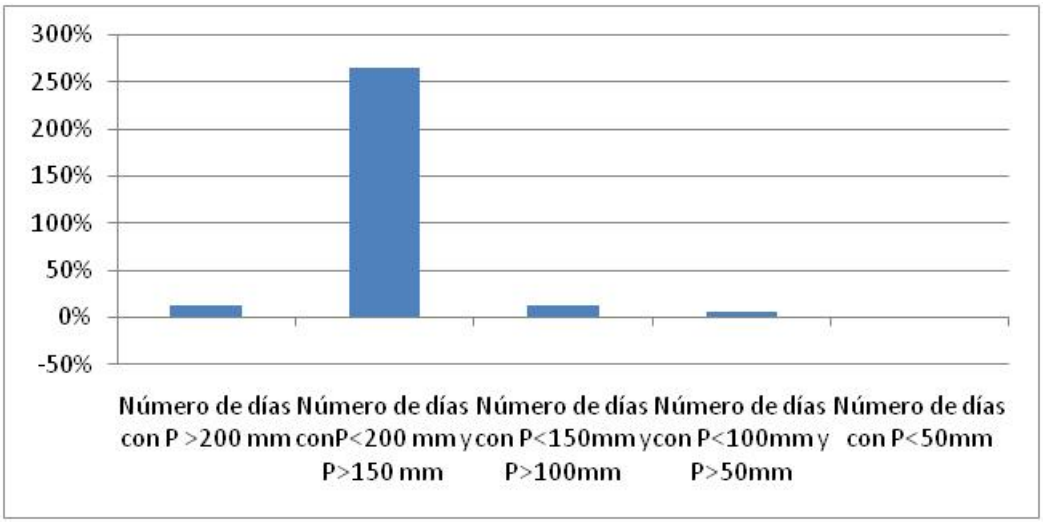
PROYECCIÓN PROMES HADCM3Q3

	días con P >200 mm	días con P<200 mm y P>150 mm	días con P<150mm y P>100mm	días con P<100mm y P>50mm	días con P<50mm
1951-1960	39	216	1.494	12.847	158.846
1961-1970	37	253	1.425	13.997	157.688
1971-1980	27	268	1.408	12.997	158.684
1981-1990	80	270	1.691	14.223	173.320
1991-2000	26	130	1.244	11.514	143.146
2001-2010	42	164	1.342	13.838	158.014
2011-2020	67	1.245	1.245	12.306	159.599
2021-2030	57	1.808	1.808	15.427	155.816
2031-2040	59	255	1.606	13.891	157.589
2041-2050	54	322	1.710	13.990	157.324



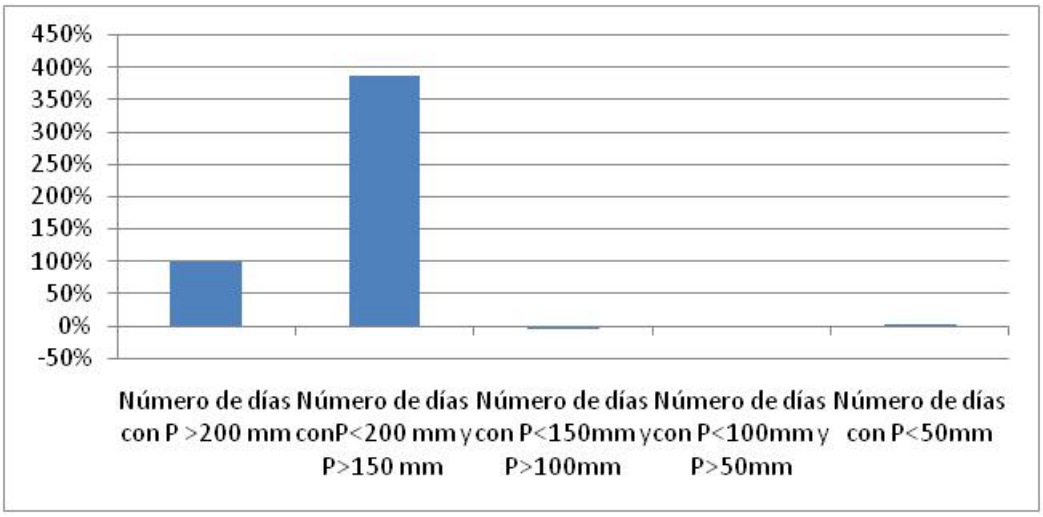
PROYECCIÓN PROMES HADCM3Q16

	días con P >200 mm	días con P<200 mm y P>150 mm	días con P<150mm y P>100mm	días con P<100mm y P>50mm	días con P<50mm
1951-1960	44	160	991	8.197	164.024
1961-1970	33	121	949	7.969	164.328
1971-1980	48	131	886	7.666	164.755
1981-1990	42	153	878	7.427	173.358
1991-2000	12	93	681	6.734	148.540
2001-2010	28	142	757	8.037	164.436
2011-2020	39	1.037	1.037	8.068	164.042
2021-2030	74	865	865	6.887	165.398
2031-2040	19	118	855	7.035	165.373
2041-2050	43	236	1.434	10.173	161.514



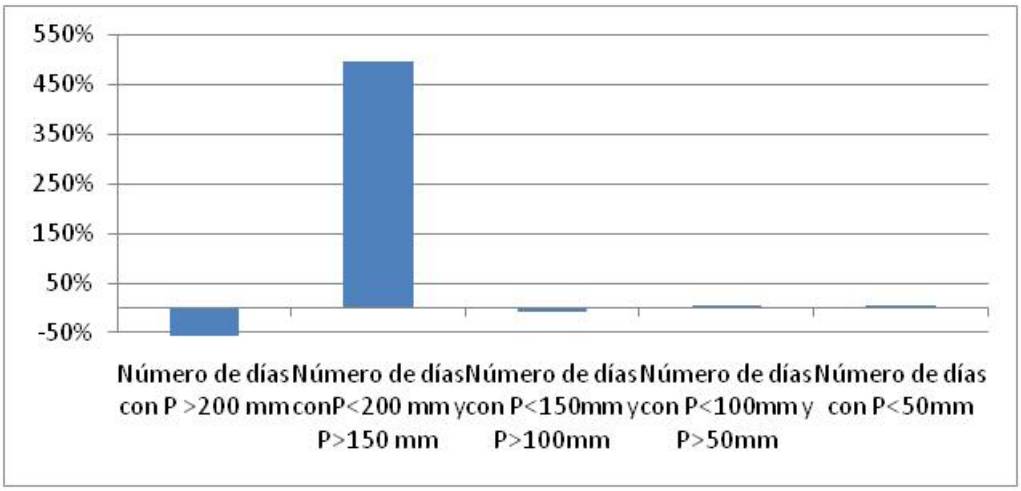
PROYECCIÓN MM5 CNCM3

	días con P >200 mm	días con P<200 mm y P>150 mm	días con P<150mm y P>100mm	días con P<100mm y P>50mm	días con P<50mm
1951-1960	2	8	195	3.659	169.585
1961-1970	0	26	233	3.993	169.148
1971-1980	5	13	207	3.991	169.178
1981-1990	0	20	227	4.096	173.400
1991-2000	0	10	166	4.067	151.817
2001-2010	0	0	197	3.705	169.498
2011-2020	0	155	155	4.672	168.566
2021-2030	8	204	204	3.680	169.483
2031-2040	6	15	294	4.111	168.974
2041-2050	0	0	128	3.504	169.768



PROYECCIÓN MM5 ECHAM 5

	días con P >200 mm	días con P<200 mm y P>150 mm	días con P<150mm y P>100mm	días con P<100mm y P>50mm	días con P<50mm
1951-1960	0	19	196	5292	167906
1961-1970	9	23	193	5.554	167.621
1971-1980	0	23	350	5.702	167.091
1981-1990	4	24	333	5.108	173.396
1991-2000	0	0	158	5.176	150.726
2001-2010	0	14	136	5.728	167.522
2011-2020	0	208	208	4.798	168.375
2021-2030	1	288	288	6.888	166.205
2031-2040	0	9	206	5.100	168.085
2041-2050	0	13	291	5.171	167.925



ANEXO 2. ÍNDICE HELIOTÉRMICO DE HUGLIN

En los siguientes cuadro vemos la evolución del porcentaje de superficie que se podría incluir en cada una de las clases de clima establecidas según el índice heliotérmico de Huglin, para facilitar el trabajo y aunque se disponían de daos anuales se han agrupado por decenas de años.

Resultados del escenario base (1951-2000)

	REMO ECHAM5	MM5 CNCM3	MM5 ECHAM5	MM5 HADM3Q3	MM5 HADM3Q16	PROMES HAD M3Q3	PROMES MPEH5	PROMES CNCM3	PROMES HADM·Q16	WRFA MPEH5	WRFB MPEH5	MEDIA
H +3	11%	1%	0%	0%	0%	0%	5%	6%	23%	0%	1%	1%
H +2	34%	16%	6%	9%	0%	4%	29%	32%	28%	11%	14%	16%
H +1	11%	19%	11%	18%	5%	9%	14%	12%	13%	20%	18%	20%
H -1	13%	15%	18%	17%	11%	14%	13%	10%	12%	17%	17%	13%
H -2	15%	16%	14%	14%	21%	16%	14%	12%	9%	12%	14%	14%
H -3	16%	33%	51%	41%	64%	56%	26%	28%	17%	39%	36%	36%

Resultados para el decenio 2001-2010

	REMO ECHAM5	MM5 CNCM3	MM5 ECHAM5	MM5 HADM3Q3	MM5 HADM3Q16	PROMES HAD M3Q3	PROMES MPEH5	PROMES CNCM3	PROMES HADM·Q16	WRFA MPEH5	WRFB MPEH5	MEDIA
H +3	14%	0%	0%	0%	3%	0%	7%	17%	31%	1%	2%	2%
H +2	34%	11%	9%	0%	23%	7%	29%	31%	26%	15%	18%	24%
H +1	10%	17%	18%	5%	18%	11%	14%	9%	12%	20%	18%	16%
H -1	16%	15%	18%	12%	14%	15%	14%	11%	11%	16%	15%	12%
H -2	14%	12%	16%	20%	15%	15%	14%	10%	8%	13%	15%	14%
H -3	12%	44%	40%	62%	28%	53%	21%	22%	12%	35%	32%	32%

Resultados para el decenio 2011-2020

	REMO ECHAM5	MM5 CNCM3	MM5 ECHAM5	MM5 HADM3Q3	MM5 HADM3Q16	PROMES HAD M3Q3	PROMES MPEH5	PROMES CNCM3	PROMES HADM·Q16	WRFA MPEH5	WRFB MPEH5	MEDIA
H +3	24%	0%	2%	0%	4%	0%	15%	16%	40%	3%	3%	4%
H +2	29%	10%	17%	2%	27%	12%	30%	30%	26%	22%	23%	29%
H +1	12%	15%	18%	7%	16%	14%	12%	10%	12%	18%	18%	14%
H -1	15%	15%	14%	18%	17%	15%	12%	11%	8%	13%	14%	13%
H -2	12%	14%	16%	18%	14%	12%	13%	11%	6%	13%	13%	13%
H -3	9%	45%	32%	55%	22%	47%	17%	22%	9%	31%	28%	27%

Resultados para el decenio 2021-2030

	REMO ECHAM5	MM5 CNCM3	MM5 ECHAM5	MM5 HADM3Q3	MM5 HADM3Q16	PROMES HAD M3Q3	PROMES MPEH5	PROMES CNCM3	PROMES HADM·Q16	WRFA MPEH5	WRFB MPEH5	MEDIA
H +3	21%	1%	1%	0%	4%	0%	13%	24%	44%	3%	3%	4%
H +2	31%	12%	14%	2%	27%	13%	30%	26%	24%	20%	23%	29%
H +1	10%	14%	21%	8%	16%	15%	12%	11%	10%	19%	18%	14%
H -1	14%	15%	15%	18%	17%	15%	12%	12%	7%	13%	12%	13%
H -2	13%	15%	14%	17%	14%	13%	13%	9%	7%	12%	13%	13%
H -3	11%	43%	35%	55%	22%	44%	21%	18%	8%	33%	30%	27%

Resultados para el decenio 2031-2040

	REMO ECHAM5	MM5 CNCM3	MM5 ECHAM5	MM5 HADM3Q3	MM5 HADM3Q16	Promes HAD M3Q3	Prome MPEH5	PROMES CNCM3	PROMES HADM·Q16	WRFA MPEH5	WRFB MPEH5	MEDIA
H +3	30%	3%	2%	0%	8%	0%	19%	35%	53%	3%	3%	7%
H +2	27%	20%	18%	2%	30%	14%	30%	24%	24%	26%	27%	32%
H +1	13%	14%	20%	7%	15%	15%	13%	12%	6%	17%	18%	13%
H -1	14%	14%	14%	17%	15%	15%	13%	9%	6%	13%	14%	13%
H -2	10%	15%	17%	18%	13%	13%	11%	6%	6%	13%	14%	14%
H -3	5%	33%	29%	57%	20%	42%	15%	15%	6%	28%	24%	20%

Resultados para el decenio 2041-2050

	REMO ECHAM5	MM5 CNCM3	MM5 ECHAM5	MM5 HADM3Q3	MM5 HADM3Q16	Promes HAD M3Q3	Prome MPEH5	PROMES CNCM3	PROMES HADM·Q16	WRFA MPEH5	WRFB MPEH5	MEDIA
H +3	37%	3%	4%	0%	7%	1%	28%	41%	46%	5%	6%	8%
H +2	24%	23%	24%	3%	32%	20%	27%	23%	25%	30%	30%	35%
H +1	13%	14%	17%	8%	15%	16%	12%	11%	9%	15%	15%	13%
H -1	11%	20%	13%	22%	15%	13%	11%	7%	8%	13%	15%	13%
H -2	10%	15%	15%	15%	13%	14%	9%	6%	6%	12%	12%	12%
H -3	6%	25%	27%	51%	18%	36%	14%	12%	7%	25%	23%	19%

ANEXO 3. ÍNDICE DE FRESCOR NOCTURNO

En los siguientes cuadro vemos la evolución del porcentaje de superficie que se podría incluir en cada una de las clases de clima establecidas según el índice frescor nocturno descrito en (Tonietto y Carbonneau 2004), para facilitar el trabajo y aunque se disponían de datos anuales se han agrupado por decenas de años.

Resultados del escenario base (1951-2000)

	REMO ECHAM5	MM5 CNCM3	MM5 ECHAM5	MM5 HADM3Q3	MM5 HADM3Q16	PROMESHAD M3Q3	PROMES MPEH5	PROMES CNCM3	PROMES HADM·Q16	WRFA MPEH5	WRFB MPEH5	MEDIA
CL -2	20%	0%	0%	8%	1%	0%	1%	1%	3%	1%	1%	1%
Cl-1	35%	26%	16%	45%	26%	14%	23%	16%	16%	17%	17%	23%
Cl +1	20%	30%	24%	24%	28%	20%	27%	22%	23%	23%	23%	28%
Cl +2	24%	45%	60%	22%	45%	66%	49%	61%	58%	59%	59%	48%

Resultados para el decenio 2001-2010

	REMO ECHAM5	MM5 CNCM3	MM5 ECHAM5	MM5 HADM3Q3	MM5 HADM3Q16	PROMES HAD M3Q3	PROMES MPEH5	PROMES CNCM3	PROMES HADM·Q16	WRFA MPEH5	WRFB MPEH5	MEDIA
CL -2	31%	2%	1%	30%	4%	1%	2%	5%	5%	2%	10%	6%
Cl-1	35%	38%	35%	44%	33%	20%	31%	18%	22%	28%	47%	36%
Cl +1	19%	24%	26%	19%	26%	24%	26%	28%	24%	25%	23%	22%
Cl +2	16%	37%	39%	8%	38%	55%	40%	49%	49%	45%	19%	35%

Resultados para el decenio 2011-2020

	REMO ECHAM5	MM5 CNCM3	MM5 ECHAM5	MM5 HADM3Q3	MM5 HADM3Q16	PROMES HAD M3Q3	PROMES MPEH5	PROMES CNCM3	PROMES HADM·Q16	WRFA MPEH5	WRFB MPEH5	MEDIA
CL -2	33%	2%	0%	38%	6%	1%	3%	3%	5%	2%	12%	7%
Cl-1	35%	43%	32%	43%	36%	21%	32%	18%	23%	28%	46%	38%
Cl +1	19%	23%	27%	14%	24%	26%	27%	27%	24%	27%	22%	23%
Cl +2	13%	32%	40%	5%	34%	53%	38%	52%	48%	44%	20%	32%

Resultados para el decenio 2021-2030

	REMO ECHAM5	MM5 CNCM3	MM5 ECHAM5	MM5 HADM3Q3	MM5 HADM3Q16	PROMES HAD M3Q3	PROMES MPEH5	PROMES CNCM3	PROMES HADM·Q16	WRFA MPEH5	WRFB MPEH5	MEDIA
CL -2	32%	8%	4%	45%	9%	1%	5%	7%	7%	3%	17%	10%
Cl-1	36%	47%	41%	43%	40%	23%	33%	26%	25%	29%	51%	40%
Cl +1	19%	24%	26%	8%	25%	27%	27%	25%	24%	25%	19%	25%
Cl +2	13%	20%	29%	4%	27%	48%	35%	42%	44%	44%	13%	25%

Resultados para el decenio 2031-2040

	REMO ECHAM5	MM5 CNCM3	MM5 ECHAM5	MM5 HADM3Q3	MM5 HADM3Q16	PROMES HAD M3Q3	PROMES MPEH5	PROMES CNCM3	PROMES HADM·Q16	WRFA MPEH5	WRFB MPEH5	MEDIA
CL -2	39%	11%	2%	50%	12%	4%	9%	6%	9%	2%	20%	12%
Cl-1	38%	46%	38%	39%	46%	29%	41%	25%	32%	26%	52%	43%
Cl +1	16%	22%	26%	7%	23%	28%	26%	25%	24%	26%	18%	24%
Cl +2	7%	21%	34%	3%	19%	39%	24%	44%	35%	46%	10%	22%

Resultados para el decenio 2041-2050

	REMO ECHAM5	MM5 CNCM3	MM5 ECHAM5	MM5 HADM3Q3	MM5 HADM3Q16	PROMES HAD M3Q3	PROMES MPEH5	PROMES CNCM3	PROMES HADM·Q16	WRFA MPEH5	WRFB MPEH5	MEDIA
CL -2	46%	21%	9%	50%	15%	4%	9%	0%	10%	3%	19%	13%
Cl-1	35%	44%	48%	41%	45%	31%	39%	20%	33%	28%	52%	44%
Cl +1	13%	23%	24%	7%	22%	27%	25%	28%	22%	24%	19%	24%
Cl +2	6%	11%	19%	3%	18%	39%	26%	52%	35%	45%	11%	19%

ANEXO 4. CÁLCULO DE EVAPOTRANSPIRACIÓN DE REFERENCIA

Para el cálculo de la evapotranspiración de referencia usamos la ecuación de FAO Penman-Monteith que se recomienda como el único método estándar para la definición y el cálculo (Allen, y otros 2006). Este método para calcular la evapotranspiración parte de datos meteorológicos y requieren de varios parámetros climatológicos y físicos. Algunos de estos parámetros se miden directamente en estaciones meteorológicas. Por ejemplo, para llevar adelante cálculos de ETo, además de la localización del sitio, la ecuación FAO Penman-Monteith requiere datos de temperatura del aire, humedad atmosférica, radiación y velocidad del viento, datos que nos proporcionan los modelos climáticos del proyecto ESCENA, salvo la radiación, que como otros parámetros se relaciona con los datos comúnmente medidos y se pueden derivar con la ayuda de relaciones directas o empíricas.

Ecuación de FAO Penman-Monteith

$$ET_0 = \frac{0{,}408\,\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273}\, u_2(e_s - e_a)}{\nabla + \gamma(1 + 0{,}34\, u_2)}$$

donde:

ET_o	evapotranspiración de referencia (mm día^{-1})
T	temperatura media del aire a 2 m de altura (°C)
G	flujo del calor de suelo (MJ m^{-2} día^{-1})
u_2	velocidad del viento a 2 m de altura (m s^{-1})
e_s	presión de vapor de saturación (kPa)
e_a	presión real de vapor (kPa)
e_s - e_a	déficit de presión de vapor (kPa)
Δ	pendiente de la curva de presión de vapor (kPa °C^{-1})
γ	constante psicrométrica (kPa °C^{-1})
R_n	radiación neta en la superficie del cultivo (MJ m^{-2} día^{-1})

Para aquellos modelos con los que no se ha podido contar con datos meteorológicos de radiación solar, humedad relativa o velocidad del viento, para facilitar el cálculo se ha usado la ecuación de Hargreaves:

$$ET_o = 0{,}0023(T_{media} + 17{,}8)(T_{max} - T_{min})0{,}5\ R_a$$

Aunque esta ecuación tiene una tendencia a subestimar los valores de ET_o bajo condiciones de viento fuerte (u_2 > 3 m s^{-1}) y a sobreestimar la ET_o bajo condiciones de elevada humedad relativa.

A continuación se detallan todas las variables y en el c

1. TEMPERATURA

El calor sensible del aire circundante transfiere energía al cultivo y entonces ejerce un cierto control en la tasa de evapotranspiración. En un día soleado y cálido, la perdida de agua por evapotranspiración será mayor que en un día nublado y fresco.

Para la aplicación de la fórmula FAO Penman-Monteith, se requiere información de temperatura diaria (promedio) máxima y mínima en grados centígrados (°C). En los casos en que solamente se tenga disponibilidad de temperaturas medias diarias, el cálculo de ET_o todavía es válido pero se podría esperar una cierta subestimación de ET_o debido a la relación.

Los resultados de los modelos nos dan las medias mensuales para cada uno de los meses de las temperaturas máximas y mínimas, con las que se calcula la media mensual. Estas temperaturas se extrapolan para todos los días del mes.

2. FLUJO DEL CALOR DEL SUELO (G)

Se cuenta con diversos modelos complejos para describir flujo del calor del suelo, aunque para períodos mensuales, si se asume una capacidad calorífica constante del suelo de 2,1 MJ m^{-3} $°C^{-1}$ y una profundidad media de suelo, se puede utilizar la siguiente fórmula:

$$G_{\text{mes}} = 0{,}14(T_{\text{mes}} - T_{\text{mes}-1})$$

Donde

G	Flujo del calor del suelo MJ m^{-2} dia^{-1}
$T_{mes,\, i\,-1}$	temperatura media del aire en el mes $_{i\,-1}$ [°C]
$T_{mes,\, i\,+1}$	temperatura media del aire en el mes $_{i\,+1}$ [°C]

3. VELOCIDAD DEL VIENTO (U2)

La velocidad del viento a diversas alturas sobre la superficie del suelo tiene valores diferentes. La fricción superficial tiende a reducir la velocidad del viento que atraviesa la superficie. La velocidad del viento es menor cerca de la superficie y aumenta con

altura. Por esta razón los anemómetros se colocan en una altura estándar elegida, 10 m en meteorología y 2 o 3 m en agrometeorologia.

Para el cálculo de la evapotranspiración, se requiere la velocidad del viento medida a 2 m sobre la superficie, mientras que los datos proporcionados por los modelos son a una altura de 10 m. Para ajustar los datos de velocidad del viento obtenido de instrumentos situados a elevaciones diferentes a la altura estándar de 2 m, se puede usar una relación logarítmica

$$u_2 = u_z \frac{4{,}87}{\ln(67{,}8\,z - 5{,}47)}$$

u_2	velocidad del viento a 2 m sobre la superficie [m s^{-1}]
u_z	velocidad del viento medida a z m sobre la superficie [m s^{-1}]
z	altura de medición sobre la superficie [m]

4. PRESIÓN MEDIA DE VAPOR DE LA SATURACIÓN (ES)

La presión de saturación de vapor puede ser calculada en función de la temperatura del

aire, pues depende de ella. La relación entre ambas variables se expresa como:

$$e^o(T) = 0{,}6108 * \exp\left[\frac{17{,}27 * T}{T + 237{,}3}\right]$$

e°(T)	presion de saturacion de vapor a la temperatura del aire, T [kPa]
T	temperatura del aire [°C]
exp [..]	2,7183 (base del logaritmo natural) elevado a la potencia [..]

la presión media de saturación de vapor para un día, semana, década o mes, debe ser calculada como el promedio de la presión de saturación de vapor a la temperatura máxima media y la presión de saturación de vapor a la temperatura mínima media del aire para ese período:

$$e_s = \frac{e^o(T_{max}) + e^o(T_{min})}{2}$$

El uso de la temperatura media del aire en lugar de las temperaturas mínima y máxima daría lugar a subestimaciones de la presión media de saturación de vapor. El correspondiente déficit de presión de vapor (un parámetro que expresa la energía evaporante de la atmosfera) también será menor y el resultado será una cierta subestimación de la evapotranspiracion del cultivo de referencia. Por lo tanto, es siempre recomendable el calcular la presión media de saturación de vapor como el promedio de la presión de saturación de vapor a la temperatura máxima y a la temperatura mínima del aire.

5. LA PRESIÓN REAL DE VAPOR (EA)

La presión real de vapor (e_a) es la presión de vapor ejercida por el vapor de agua en el aire. Cuando el aire no se satura, la presión real de vapor será más baja que la presión de vapor de saturación. La diferencia entre la presión de saturación y la presión real de vapor se llama déficit de presión de vapor o déficit de saturación y es un indicador preciso de la real capacidad evaporativa del aire.

La presión real de vapor se puede también derivar de la humedad relativa. Dependiendo

de la disponibilidad de datos de humedad, se pueden utilizar diversas ecuaciones según:

1. Exista disponibilidad de HR_{max} y HR_{min}:

$$e_a = \frac{e^o(T_{min})\frac{HR_{max}}{100} + e^o(T_{max})\frac{HR_{min}}{100}}{2}$$

Donde:

e_a	presión real de vapor [kPa]
$e°(T_{min})$	presión de saturación de vapor a la temperatura mínima diaria [kPa]
$e°(T_{max})$	presión de saturación de vapor a la temperatura máxima diaria [kPa]
HR_{max}	humedad relativa máxima [%]
HR_{min}	humedad relativa mínima [%]

2. cuando no se cuenta con datos disponibles de HR_{min} y HR_{max} pero sí la HR_{media} como es nuestro caso, aunque menos precisa que la anterior se usa la siguiente fórmula:

$$e_a = e^o(T_{media})\frac{HR_{media}}{100}$$

3. Aunque no sea nuestro caso, si los datos de humedad no hubiesen estado disponibles o fuesen de calidad cuestionable, se podría llevar adelante una estimación de la presión real de vapor, ea, si se asume que la temperatura del punto de rocío ($T_{rocío}$) es similar a la temperatura mínima diaria (T_{min}). Se asume implícitamente que a la salida del sol, cuando la temperatura del aire está alrededor de T_{min}, el aire está casi saturado con vapor de agua y que la humedad relativa es de alrededor de 100%. Si T_{min} se utiliza para representar $T_{rocío}$ entonces:

$$e_a = e^o(T) = 0{,}6108 * exp\left[\frac{17{,}27 * T}{T + 237{,}3}\right]$$

4. PENDIENTE DE LA CURVA DE PRESIÓN DE SATURACIÓN DE VAPOR (Δ)

Para el cálculo de evapotranspiración, se requiere calcular la pendiente de la relación entre la presión de saturación de vapor y la temperatura, Δ. La pendiente de la curva a una temperatura dada se da por:

$$\Delta = \frac{4098 * \left[06108 * \exp\left(\frac{17{,}27 * \mathrm{T}}{\mathrm{T} + 237{,}3}\right)\right]}{(\mathrm{T} + 237{,}3)^2}$$

donde:

Δ	pendiente de la curva de la presión de saturación de vapor a la temperatura del aire T [kPa °C^{-1}]
T	temperatura del aire [°C]
exp[..]	2,7183 (base del logaritmo natural) elevado a la potencia [..]

5. CONSTANTE PSICROMÉTRICA (γ)

La constante psicométrica γ, se calcula por:

$$\gamma = \frac{c_p\, P}{\varepsilon\, \lambda} = 0{,}665 * 10^{-3}$$

donde:

γ	constante psicométrica [kPa °C^{-1}]
P	presión atmosférica [kPa]

λ	calor latente de vaporización[1] = 2,45 [MJ kg^{-1}]
c_p	calor especifico a presión constante, 1,013 x 10-3 [MJ kg-1 °C^{-1}]
ε	cociente del peso molecular de vapor de agua /aire seco = 0,622

A. PRESIÓN ATMOSFÉRICA (P)

La presión atmosférica, P, es la presión ejercida por el peso de la atmosfera terrestre. La evaporación en altitudes elevadas ocurre en parte gracias a la baja presión atmosférica que se expresa con la constante psicométrica. Este efecto es, sin embargo, pequeño y en los procedimientos del cálculo, el valor medio para una localidad es suficiente.

Para calcular P puede emplearse una simplificación de la ley de los gases ideales, a una temperatura atmosférica estándar de 20°C:

$$P = 101{,}3\left(\frac{293 - 0{,}0065z}{293}\right)^{5{,}26}$$

Donde:

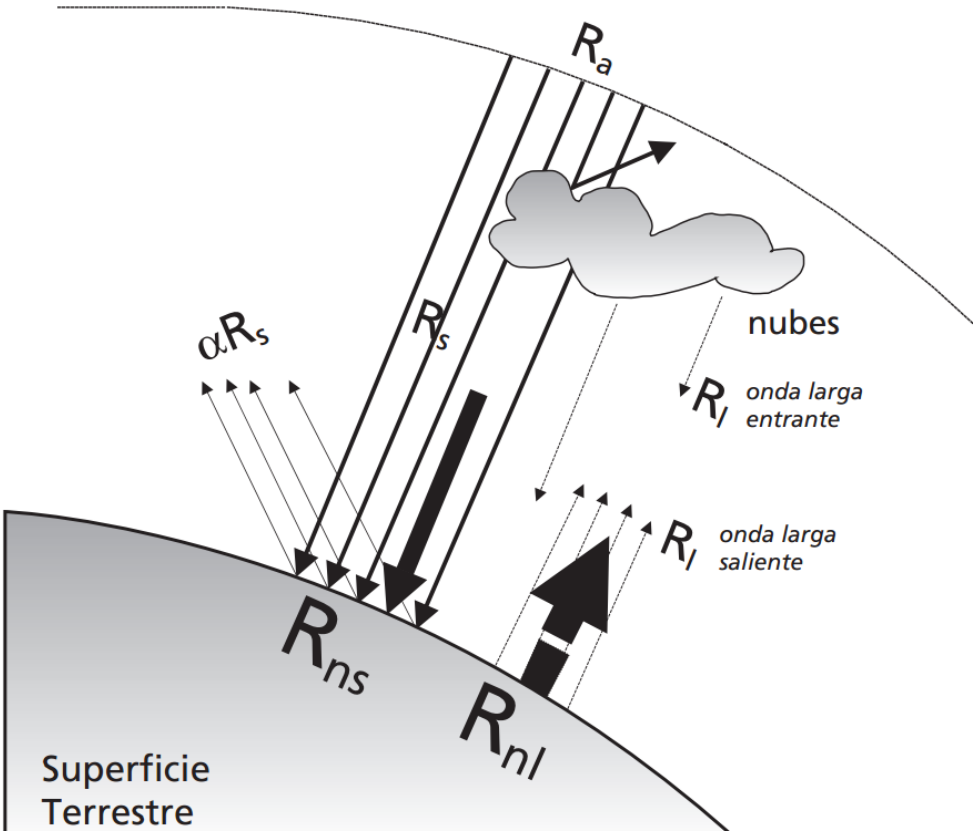
P	Presión atmosférica [kPa]
z	Elevación sobre el nivel del mar [m]

6. RADIACIÓN

Debido a las diferencias en la posición del planeta y a su movimiento alrededor del sol, esta cantidad potencial de radiación es diferente para cada latitud y para las diversas estaciones del año. En la figura xxxx puede verse un esquema de los diversos tipos de radiación.

[1] Como λ varía levemente dentro de rangos de temperaturas normales, se considera un valor constante de 2,45 MJ kg-1 para la simplificación de la ecuación de FAO Penman-Monteith. Este valor corresponde al calor latente de vaporización a una temperatura del aire de alrededor de 20 °C.

Figura 33 Radiacion entrante (Allen, y otros 2006).



La radiación neta, Rn, es la diferencia entre la radiación entrante y saliente de longitudes de onda cortas y largas. Es el equilibrio entre la energía absorbida, reflejada y emitida por la superficie terrestre o la diferencia de la radiación de onda corta entrante neta (R_{ns}) y la radiación de onda larga saliente neta (R_{nl}). La Rn es normalmente positiva durante el día y negativa durante la noche. El valor diario total para Rn es casi siempre positivo para 24 horas, excepto en condiciones extremas de latitudes elevadas. La radiación neta diaria (R_n) está expresada en megajoules por metro cuadrado por día (MJ m^{-2} $día^{-1}$). Estos datos no están disponibles comúnmente en forma directa pero pueden derivarse la diferencia entre la radiación neta de onda corta (R_{ns}) y la radiación neta de onda larga (R_{nl}):

$$R_n = R_{ns} - R_{nl}$$

R_n	radiación neta diaria (MJ m^{-2} $día^{-1}$)
R_{ns}	radiación neta de onda corta (ecuación
R_{nl}	radiación neta de onda larga (ecuación

A. RADIACIÓN NETA SOLAR O DE ONDA CORTA (RNS)

La radiación neta de onda corta resultante del equilibrio entre la radiación solar entrante y la reflejada está dada por:

$$R_{ns} = (1 - \alpha)R_s$$

Donde:

R_{ns}	radiación neta solar o de onda corta [MJ m^{-2} dia^{-1}]
α	albedo o coeficiente de reflexión del cultivo, que es 0,23 para el cultivo hipotético de referencia [adimensional]
R_s	Radiación solar entrante [MJ m^{-2} dia^{-1}]

I. ALBEDO (A)

Una cantidad considerable de la radiación solar que llega a la superficie terrestre se refleja en ella. La fracción, α, de la radiación solar que es reflejada por la superficie se conoce como albedo. El albedo es muy variable de acuerdo al tipo de superficie y el ángulo de incidencia o la pendiente de la superficie terrestre. Su valor puede ser tan elevado como 0,95 para la nieve recientemente caída y tan bajo como 0,05 para un suelo desnudo y húmedo. Una cubierta verde de vegetación tiene un albedo de entre 0,20 a 0,25. Para el cultivo de referencia, se asume que α tiene un valor de 0,23.

II. RADIACIÓN SOLAR O DE ONDA CORTA (RS)

Cuando la radiación atraviesa la atmósfera para llegar a la superficie terrestre, parte de ella se dispersa, refleja o absorbe por los gases, las nubes y el polvo atmosféricos. La cantidad de radiación que llega a un plano horizontal en la superficie terrestre se conoce como radiación solar, R_s. Como el sol emite energía por medio de ondas electromagnéticas caracterizadas por longitudes de onda cortas, la radiación solar también se conoce como radiación de onda corta.

Al no disponer de datos sobre radiación utilizamos un método alternativo recomendado por la FAO, según el cual se puede estimar Radiación solar según las diferencias térmicas. La diferencia entre la temperatura máxima y mínima del aire se relaciona con el grado de nubosidad en una localidad. Condiciones despejadas determinan altas temperaturas durante el día (T_{max}) porque la atmósfera es transparente a la radiación solar entrante.

También se presentan bajas temperaturas durante la noche (T_{min}) porque menos radiación saliente de onda larga es absorbida por la atmósfera. Por otra parte, en condiciones cubiertas (nubladas), el valor de T_{max} es relativamente más pequeño porque una parte significativa de la radiación solar entrante nunca alcanza la superficie de la tierra y es absorbida y reflejada por las nubes. Similarmente, T_{min} será relativamente más alta porque la cobertura de la nubosidad actúa como cobertor y disminuye la radiación saliente neta de onda larga. Por lo tanto, la diferencia entre temperatura del aire máxima y mínima (T_{max}- T_{min}) se puede utilizar como indicador de

la fracción de la radiación extraterrestre que alcanza la superficie de la tierra. Este principio ha sido utilizado por Hargreaves y Samani para desarrollar estimaciones de ET_o usando solamente datos de temperatura del aire.

La ecuación de radiación de Hargreaves, ajustada y validada en varias estaciones meteorológicas en una amplia variedad de condiciones climáticas, está dada por:

$$R_s = K_{Rs}\sqrt{(T_{max} - T_{min})}R_a$$

Donde:

R_a	radiación extraterrestre [MJ m^{-2} d^{-1}]
T_{max}	temperatura máxima del aire [°C]
T_{min}	temperatura mínima del aire [°C]
k_{Rs}	coeficiente de ajuste (0,16 .. 0,19) [°C-0,5]

La raíz cuadrada de la diferencia de temperaturas está muy relacionada con la radiación solar diaria en una localidad dada. Los coeficientes de ajuste, k_{Rs} , son empíricos y se diferencian para zonas del ‘ interior ‘ y las regiones ‘ costeras ‘:

- para las localidades «interiores», en donde la masa de tierra domina y las masas de aire no están influenciadas fuertemente por un cuerpo grande del agua, k_{Rs}≈ 0,16;
- para las localizaciones «costeras», situadas en la costa o cerca de una masa grande de tierra y donde las masas de aire están influenciadas por un cuerpo de agua cercano, k_{Rs}≈ 0,19.

Para nuestro caso debido al gran número de datos que manejamos, y ya que la mayor parte de las zonas vitícolas están en zonas interiores, hemos supuesto un dato medio de k_{Rs}≈ 0,16, aún a riesgo de cometer más errores en las zonas costeras.

B. RADIACIÓN DE ONDA LARGA (RNL)

La radiación solar absorbida por la tierra se convierte en energía térmica. La tierra pierde esta energía por medio de varios procesos, entre los cuales se encuentra la emisión de radiación. La tierra, que tiene una temperatura mucho más baja que el sol, emite energía radiante con longitudes de onda más largas que el sol. Por ello, la radiación terrestre se conoce como radiación de onda larga. La radiación de onda larga emitida por el planeta es absorbida por la atmósfera o perdida hacia el espacio. La radiación de onda larga recibida por la atmósfera aumenta su temperatura. Por consiguiente, la atmósfera irradia también energía. Parte de la radiación emitida por la atmósfera se dirige nuevamente hacia la superficie terrestre. Por lo tanto, la superficie terrestre emite y recibe radiación de onda larga. La diferencia entre la radiación de onda larga entrante y saliente se llama radiación neta de onda larga, Rnl . Como la

radiación saliente de onda larga es casi siempre mayor que la radiación entrante, Rnl representa una pérdida de energía.

A su vez

$$R_{nl} = \sigma\left(\frac{{T_{max,k}}^4 + {T_{min,k}}^4}{2}\right)\left(0{,}34 - 0{,}14\sqrt{e_a}\right)\left[1{,}35\frac{R_s}{R_{so}} - 0{,}35\right]$$

Donde

R_{nl}	Radiación neta de onda larga [MJ m^{-2} dia^{-1}]
σ	constante de Stefan-Boltzmann [4,903 x 10^{-9} MJ K^{-4} m^{-2} dia^{-1}]
$T_{max,K}$	temperatura máxima absoluta durante un periodo de 24 horas [^oK = ^oC + 273,16]
$T_{min,K}$	temperatura mínima absoluta durante un periodo de 24 horas [^oK = ^oC + 273,16]
e_a	presión de vapor real [kPa]
R_s	radiación solar medida o calculada [MJ m^{-2} dia^{-1}]
R_{so}	radiación en un día despejado [MJ m^{-2} dia^{-1}]

I. RADIACIÓN SOLAR MEDIDA O CALCULADA (RS)

(ver punto 8.1.2)

II. RADIACIÓN EN UN DÍA DESPEJADO (RSO)

Se usa la siguiente fórmula:

R_{so}= (0,75+ 2 10-5 z)*Ra

Donde:

R_a	Radiación extraterrestre
z	elevacion de la estacion sobre el nivel del mar [m]

III. RADIACIÓN EXTRATERRESTRE (RA)

La radiación que choca a una superficie perpendicular a los rayos del sol en el extremo superior de la atmosfera terrestre, se llama constante solar, y tiene un valor aproximado de 0,082 MJ m-2 min-1. La intensidad local de la radiación, sin embargo está determinada por el ángulo entre la dirección de los rayos solares y la superficie de la atmosfera. Este ángulo cambia durante el día y es diferente en diversas latitudes y en diversas épocas del ano. La radiación solar recibida en la parte superior de la atmosfera terrestre sobre una superficie horizontal se conoce como radiación (solar) extraterrestre, Ra.

Si el sol se encuentra directamente encima de la cabeza, el ángulo de incidencia es cero y la radiación extraterrestre es 0,082 MJ m-2 min-1. Así como las estaciones

cambian, la posición del sol, la longitud del día y la radiación extraterrestre también cambian. La radiación extraterrestre es entonces una función de la latitud, la época del año y la hora del día.

Tabla 7. Valores de R_a

Hemisferio Norte												Latitud
Ene.	Feb.	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic	grad.
0	2,6	10,4	23	35,2	42,5	39,4	28	14,9	4,9	0,1	0	70
0,1	3,7	11,7	23,9	35,3	42	38,9	28,6	16,1	6	0,7	0	68
0,6	4,8	12,9	24,8	35,6	41,4	38,8	29,3	17,3	7,2	1,5	0,1	66
1,4	5,9	14,1	25,8	35,9	41,2	38,8	30	18,4	8,5	2,4	0,6	64
2,3	7,1	15,4	26,6	36,3	41,2	39	30,6	19,5	9,7	3,4	1,3	62
3,3	8,3	16,6	27,5	36,6	41,2	39,2	31,3	20,6	10,9	4,4	2,2	60
4,3	9,6	17,7	28,4	37	41,3	39,4	32	21,7	12,1	5,5	3,1	58
5,4	10,8	18,9	29,2	37,4	41,4	39,6	32,6	22,7	13,3	6,7	4,2	56
6,5	12	20	30	37,8	41,5	39,8	33,2	23,7	14,5	7,8	5,2	54
7,7	13,2	21,1	30,8	38,2	41,6	40,1	33,8	24,7	15,7	9	6,4	52
8,9	14,4	22,2	31,5	38,5	41,7	40,2	34,4	25,7	16,9	10,2	7,5	50
10,1	15,7	23,3	32,2	33,8	41,8	40,4	34,9	26,6	18,1	11,4	8,7	48
113	16,9	24,3	32,9	39,1	41,9	40,6	35,4	27,5	19,2	12,6	9,9	46
12,5	18	25,3	33,5	39,3	41,9	40,7	35,9	28,4	20,3	13,9	11,1	44
13,8	19,2	26,3	34,1	39,5	41,9	40,8	36,3	29,2	21,4	15,1	12,4	42
15	20,4	27,2	34,7	39,7	41,9	40,8	36,7	30	22,5	16,3	13,6	40
16,2	21,5	28,1	35,2	39,9	41,8	40,8	37	30,7	23,6	17,5	14,8	38
17,5	22,6	29	35,7	40	41,7	40,8	37,4	31,5	24,6	18,7	16,1	36
18,7	23,7	29,9	36,1	40	41,6	40,8	37,6	32,1	25,6	19,9	17,3	34
19,9	24,8	30,7	35,5	40	41,4	40,7	37,9	32,8	26,6	21,1	18,5	32
21,1	25,8	31,4	36,8	40	41,2	40,6	38	33,4	27,6	22,2	19,8	30
22,3	26,8	32,2	37,1	40	40,9	40,4	38,2	33,9	28,5	23,3	21	28
23,4	27,8	32,8	37,4	39,9	40,6	40,2	38,3	34,5	29,3	24,5	22,2	26
24,6	28,8	33,5	37,6	39,7	40,3	39,9	38,3	34,9	30,2	25,5	23,3	24
25,7	29,7	34,1	37,8	39,5	40	39,6	38,4	35,4	31	26,6	24,5	22
26,8	30,6	34,7	37,9	39,3	39,5	39,3	38,3	35,8	31,8	27,7	25,6	20
27,9	31,5	35,2	38	39	39,1	38,9	38,2	36,1	32,5	28,7	26,8	18
28,9	32,3	35,7	38,1	38,7	38,6	38,5	38,1	36,4	33,2	29,6	27,9	16

La radiación extraterrestre, R_a, para cada día del ano y para diversas latitudes se puede estimar a partir de la constante solar, la declinación solar y la época del año:

$$R_a = \frac{24 * 60}{\pi} G_{sc} d_r [\omega_s \sin(\varphi) \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) \sin(\omega)]$$

Donde

R_a	radiación extraterrestre [MJ m^{-2} dia^{-1}]
G_{sc}	constante solar = 0,082 MJ m^{-2} min^{-1},
d_r	distancia relativa inversa Tierra-Sol
ω_s	ángulo de radiación a la puesta del sol
φ	latitud [rad]
δ	declinación solar

Los valores de R_a para diversas latitudes se presentan en la Tabla 7. Estos valores representan Ra en el día 15 de cada mes. Estos mismos valores se desvían de valores promedio de los valores diarios del mes en menos del 1% para todas las latitudes durante periodos libres de hielo y se incluyen para simplificar el cálculo.

ANEXO 5.INDICE DE SEQUÍA

En el siguiente anexo pueden consultarse los resultados de cada uno de los modelos que se han calculado para el índice de sequía

Resultados del escenario base (1951-2000)

	REMO MPEH5	MM5 CNCM3	MM5 ECHAM5	PPROMES HAD M3Q3	PROMES MPEH5	PROMES CNCM3	PROMES HADM·Q16	WRFA MPEH5	WRFB MPEH5	MEDIA
muy húmedo	20,8%	29,8%	22,8%	54,3%	26,8%	24,2%	19,4%	21,2%	22,4%	25,7%
húmedo	7,1%	13,4%	9,9%	13,6%	7,5%	5,6%	2,8%	5,7%	6,2%	7,9%
sub húmedo	12,5%	14,3%	16,1%	13,1%	8,5%	7,5%	4,6%	8,8%	14,5%	11,4%
moderadamente seco	14,1%	17,0%	19,7%	9,6%	11,9%	7,1%	7,4%	18,3%	19,2%	15,2%
Seco	18,3%	12,5%	17,9%	7,8%	16,3%	11,4%	11,5%	19,1%	21,7%	17,0%
Muy seco	27,3%	12,9%	13,7%	1,6%	29,0%	44,1%	54,2%	26,8%	16,1%	22,7%

Resultados de la proyección 2001-2010

	REMO MPEH5	PROMES CNCM3	PROMES HADM3Q3	PROMES HADM3Q16	PROMES MPEH5	WRFA MPEH5	WRFB MPEH5	MM5 CNCM3	MM5 MPEH5	MEDIA
muy húmedo	17,6%	20,6%	18,6%	18,6%	24,2%	18,9%	19,7%	25,6%	20,8%	20,0%
húmedo	6,4%	3,8%	2,1%	2,1%	4,9%	3,7%	4,4%	8,8%	9,3%	4,8%
sub húmedo	8,4%	5,5%	4,8%	4,8%	8,4%	6,7%	8,3%	15,4%	17,4%	7,1%
moderadamente seco	17,2%	7,1%	6,2%	6,2%	11,0%	14,8%	20,0%	12,9%	20,6%	12,4%
Seco	14,9%	7,5%	10,4%	10,4%	14,6%	21,5%	21,4%	16,9%	23,1%	16,6%
Muy seco	35,5%	55,5%	57,8%	57,8%	36,9%	34,5%	26,2%	20,4%	8,8%	39,2%

Resultados de la proyección 2011-2020

	REMO MPEH5	PROMES CNCM3	PROMES HADM3Q3	PROMES HADM3Q16	PROMES MPEH5	WRFA MPEH5	WRFB MPEH5	MM5 CNCM3	MM5 MPEH5	MEDIA
muy húmedo	17,6%	21,5%	23,9%	16,3%	23,9%	19,3%	20,1%	28,1%	20,0%	19,9%
húmedo	6,0%	7,1%	5,9%	2,4%	5,9%	4,2%	5,1%	13,8%	7,6%	4,4%
sub húmedo	10,0%	7,4%	7,6%	3,8%	7,6%	7,3%	9,1%	14,9%	15,2%	8,6%
moderadamente seco	14,7%	8,0%	8,5%	4,8%	8,5%	13,9%	18,8%	17,4%	19,3%	11,9%
Seco	13,8%	9,9%	12,8%	9,9%	12,8%	18,0%	18,2%	13,2%	16,6%	15,7%
Muy seco	37,9%	46,0%	41,3%	62,9%	41,3%	37,3%	28,7%	12,5%	21,2%	39,5%

Resultados de la proyección 2021-2030

	REMO MPEH5	PROMES CNCM3	PROMES HADM3Q3	PROMES HADM3Q16	PROMES MPEH5	WRFA MPEH5	WRFB MPEH5	MM5 CNCM3	MM5 MPEH5	MEDIA
muy húmedo	19,0%	19,3%	16,1%	16,1%	26,4%	20,5%	20,4%	27,5%	21,9%	20,1%
húmedo	4,8%	6,7%	2,8%	2,8%	6,9%	4,6%	5,3%	15,2%	9,1%	4,5%
sub húmedo	9,3%	7,8%	2,1%	2,1%	7,0%	7,5%	10,4%	15,7%	17,1%	8,5%
moderadamente seco	16,1%	7,6%	4,7%	4,7%	9,9%	15,2%	18,5%	16,7%	16,5%	11,7%
Seco	14,5%	11,3%	7,1%	7,1%	12,6%	18,3%	18,8%	13,4%	17,5%	16,3%
Muy seco	36,1%	47,3%	67,3%	67,3%	37,2%	34,0%	26,6%	11,6%	17,9%	38,8%

Resultados de la proyección 2031-2040

	REMO MPEH5	PROMES CNCM3	PROMES HADM3Q3	PROMES HADM3Q16	PROMES MPEH5	WRFA MPEH5	WRFB MPEH5	MM5 CNCM3	MM5 MPEH5	MEDIA
muy húmedo	15,7%	16,4%	13,1%	13,1%	25,1%	19,3%	19,9%	21,6%	22,8%	17,9%
húmedo	7,1%	3,3%	2,4%	2,4%	6,2%	6,0%	6,3%	10,6%	8,3%	3,5%
sub húmedo	9,6%	4,4%	3,0%	3,0%	8,2%	8,5%	11,5%	18,1%	15,4%	6,9%
Moderadamente seco	17,1%	6,9%	1,8%	1,8%	9,8%	15,1%	20,8%	12,2%	20,6%	11,1%
Seco	15,6%	9,3%	5,0%	5,0%	15,0%	20,4%	20,6%	16,8%	16,7%	17,9%
Muy seco	34,9%	59,6%	74,7%	74,7%	35,7%	30,7%	20,8%	20,8%	16,1%	42,6%

Resultados de la proyección 2041-2050

	REMO MPEH5	PROMES CNCM3	PROMES HADM3Q3	PROMES HADM3Q16	PROMES MPEH5	WRFA MPEH5	WRFB MPEH5	MM5 CNCM3	MM5 MPEH5	MEDIA
muy húmedo	13,6%	15,2%	16,2%	16,2%	20,9%	17,7%	18,8%	10,3%	17,2%	17,1%
húmedo	5,6%	3,1%	2,6%	2,6%	1,9%	2,7%	3,0%	3,0%	6,8%	2,9%
sub húmedo	5,7%	4,1%	2,5%	2,5%	4,8%	5,7%	5,9%	8,0%	9,7%	4,2%
Moderadamente seco	10,8%	7,3%	4,5%	4,5%	7,8%	9,3%	15,8%	15,7%	17,6%	8,7%
Seco	16,6%	9,1%	8,2%	8,2%	9,4%	20,3%	20,0%	18,9%	18,3%	13,5%
Muy seco	47,8%	61,2%	66,0%	66,0%	55,2%	44,2%	36,6%	44,0%	30,4%	53,6%