

1. Introducción y objetivos

El diseño de un sistema de riego localizado requiere la integración de numerosa información y el uso de una gran variedad de metodologías que, integradas permiten componer un proyecto específico para cada situación. Los conocimientos teóricos, en su esfuerzo por mantener un nivel conceptual adecuado, en ocasiones no transmiten al estudiante la importancia de cada decisión a tomar en el proceso de diseño.

Este manual docente pretende, a través de un caso de estudio, completar esa laguna y ofrecer un protocolo de cálculo sencillo para que sirva de guía en el proceso de creación de un proyecto técnico relacionado con el riego localizado.

Para este caso de estudio se va a considerar una zona al azar y se van a buscar parcelas con la hipótesis de que el propietario desea poner un riego localizado para varios aprovechamientos en ellas. Mediante esta hipótesis podremos analizar cómo se puede adaptar a cada cultivo el proceso de diseño.

Para una mayor cercanía con el estudiante, se han seleccionado métodos y fuentes de información fácilmente accesibles por internet. De este modo el estudiante puede comprobar in situ la viabilidad de los procedimientos que se explican.

Cada uno de los métodos que se explican puede ser mejorado con las adecuadas herramientas informáticas y así alcanzar el nivel de exigencia que se requiere a nivel profesional.

2. Elección de la parcela.

Para empezar, escogeremos al azar una parcela. Para este caso de estudio se ha buscado una parcela en la provincia de Almería.



Figura 1 Identificación de la parcela escogida (Fuente: Google Earth)

Cuando se utiliza **Google Earth**, se pueden ver las coordenadas y las cotas. Una opción más adecuada para un trabajo profesional es utilizar una capa de vista de satélite o una ortofoto. En este caso se va a trabajar con **QGIS** y se necesita localizar la parcela para crear una capa con las lindes solamente. Para ello lo más sencillo es entrar en la página oficial de catastro y así poder descargar la información.

<https://www1.sedecatastro.gob.es/Cartografia/mapa.aspx?buscar=S>

Una vez dentro se pulsa en el mapa y ofrecerá la oportunidad de ver polígono y parcela, o bien se amplía la imagen si se sabe dónde está en un mapa. Una vez localizada la parcela se puede seleccionar. Una vez que tenemos la imagen podemos marcar la herramienta de descarga de parcelas en formato *dxf*. Una vez seleccionadas las parcelas que se desea descargar, se puede hacer la descarga.

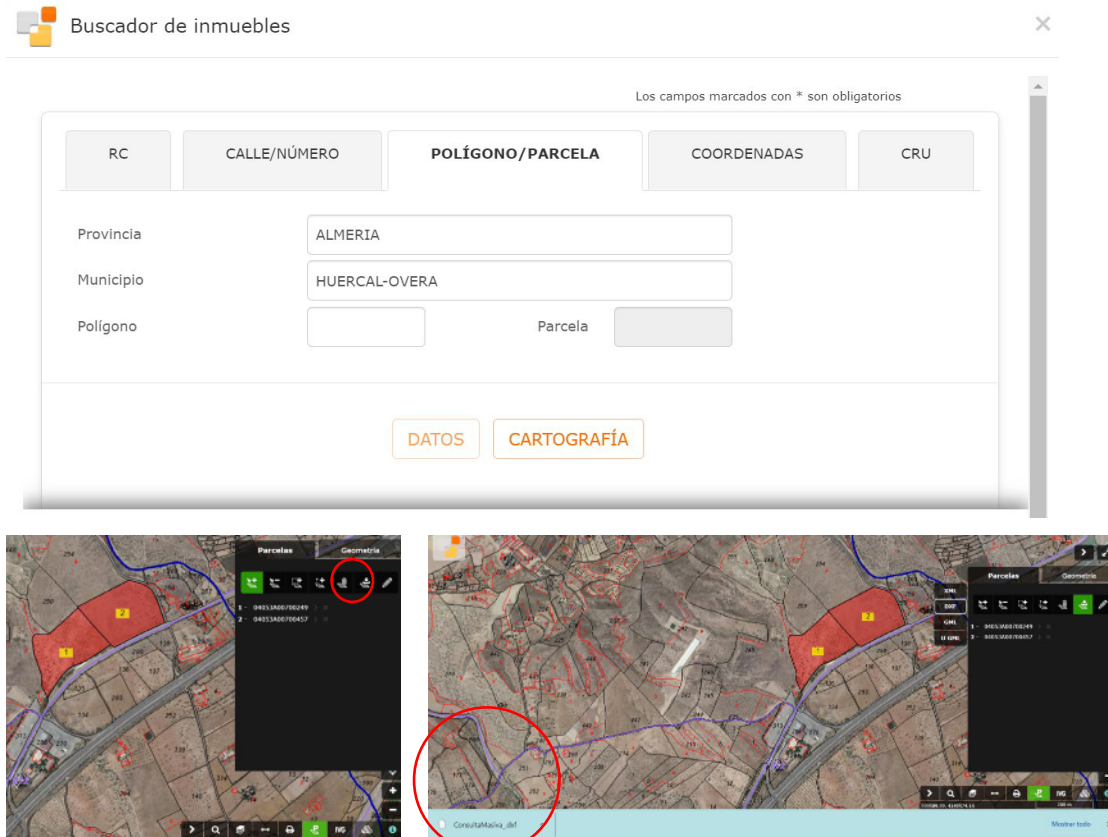


Figura 2 Selección de la parcela a partir de datos de catastro (Fuente: Catastro)

Aparecerá un archivo, que podemos renombrar, con el nombre de `consultamasiva.dxf`, que puede ser visualizado en **QGIS**. Creamos un archivo **QGIS** con el nombre que queramos e importamos el *dxf* recién descargado. Para esta operación, se usa el comando `importar dxf`

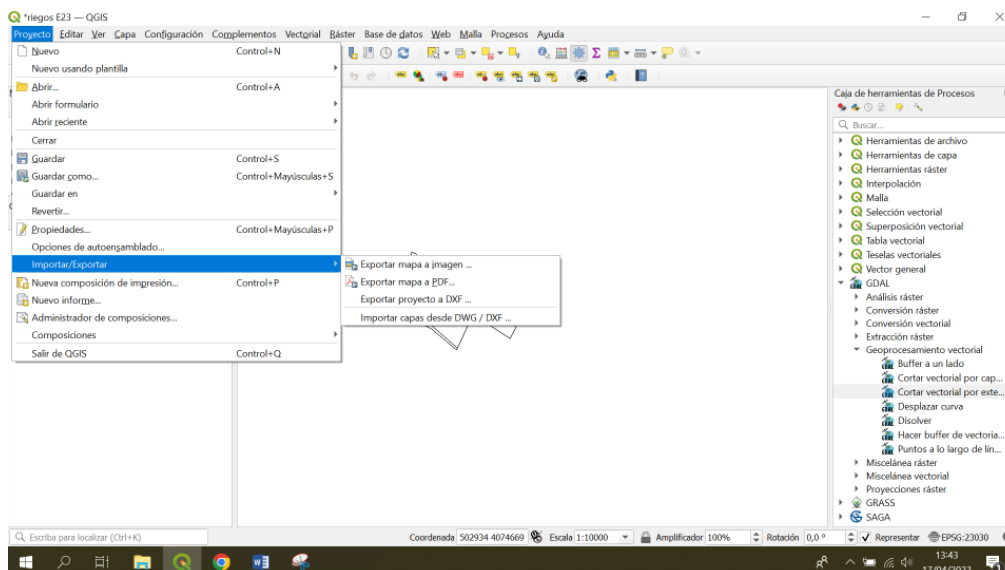


Figura 3 Importar capas dxf en QGIS

Nos va a pedir que nombremos la base de datos en donde se copiará la información.

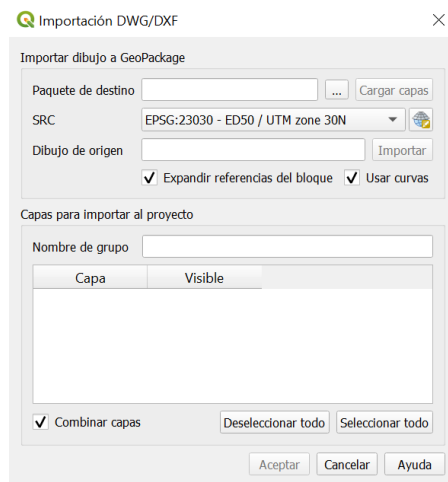


Figura 4 selección del tipo de capa a importar

Como paquete de destino, ponemos el nombre de la base de datos, después hay que decirle **importar** y permitirá la selección de los archivos *dxf* que deseemos. Una vez seleccionados hay que pedirle que combine capas si no estuviese seleccionado ya. El resultado es la parcela puesta en nuestro **QGIS**.

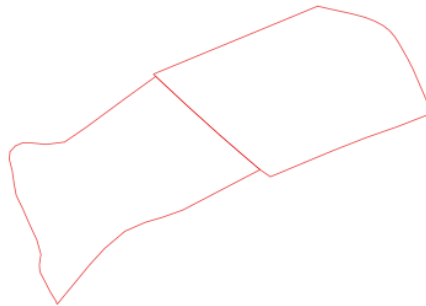


Figura 5 perfil de las parcelas seleccionadas

3. Búsqueda de la información sobre los suelos

Para hacer el trabajo vamos a necesitar datos de suelos. El lugar para obtenerlos, si se trabaja con fincas de Andalucía, es la página de la Junta de Andalucía denominada **REDIAM**.

<https://portalrediam.cica.es/descargas>

que presenta el siguiente aspecto

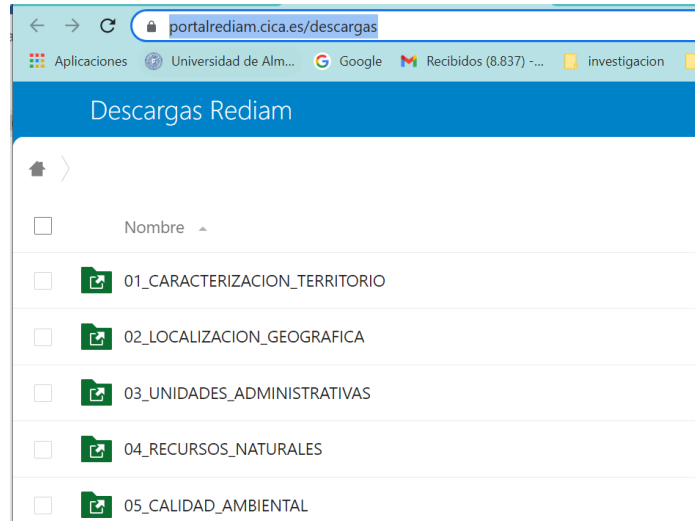


Figura 6 Aspecto de la pantalla de acceso a REDIAM

Una vez localizada la página podemos descargar diferente información GIS de muchos temas de interés. Por ejemplo, de suelos. Los mejores datos, para la zona del SE de España se obtendrán del proyecto **LUCDEME** (Pérez et al, 1987).



Figura 7 Información sobre suelos contenida en REDIAM

Para descargar la información basta con seleccionar el recurso y marcar **acciones** junto a **nombre**.



Figura 8 Descarga de información ambiental

Luego este recurso puede ser seleccionado para incorporarlo a **QGIS**. Es conveniente recordar que se trata de un mapa vectorial.

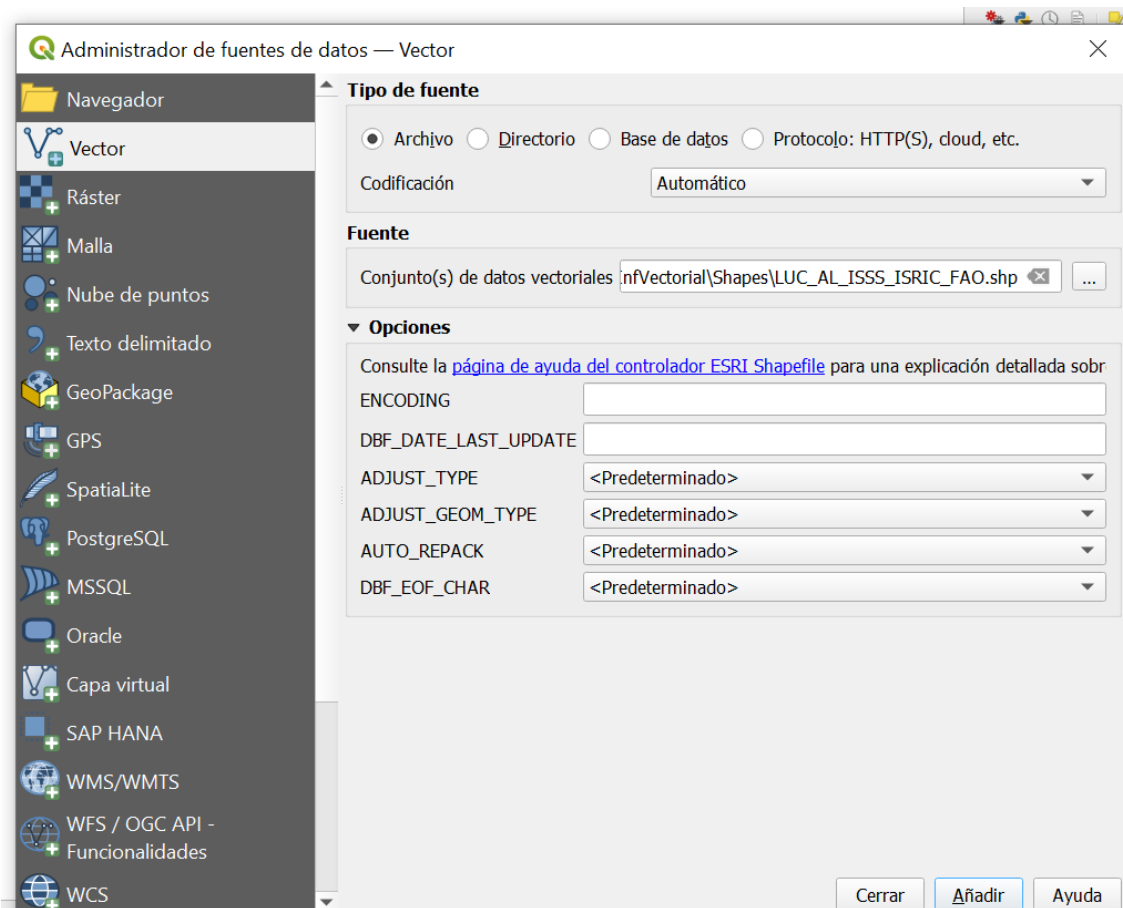


Figura 9 Incorporación del mapa de suelos a **QGIS**

Es conveniente recortar el mapa para hacerlo más manejable. Para ello, hay varias herramientas, una de las cuales está en **GDAL** y se llama **Cortar vectorial por extensión**. Se marca en la pantalla la extensión deseada y después quedará incluida como una capa no permanente. Es el momento de **guardar como**, para conservar el recorte recién hecho con un nombre adecuado.

Podemos entonces eliminar las capas que no nos interesen ya y quedará todo de un tamaño más manejable.

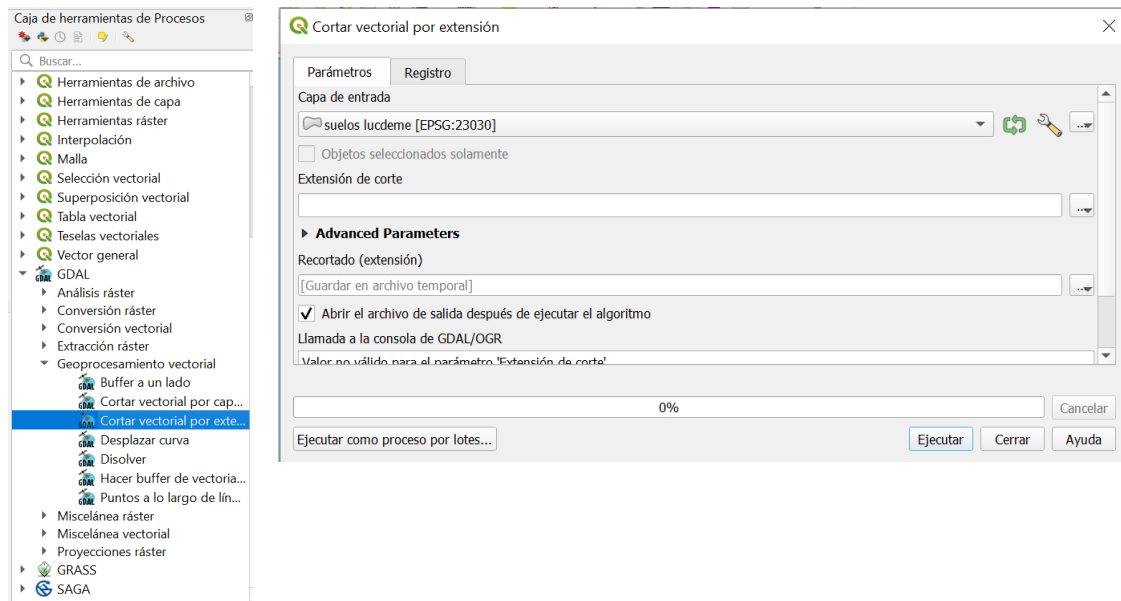


Figura 10 Herramienta de recorte de un mapa vectorial en QGIS

Puede quedar con este aspecto.

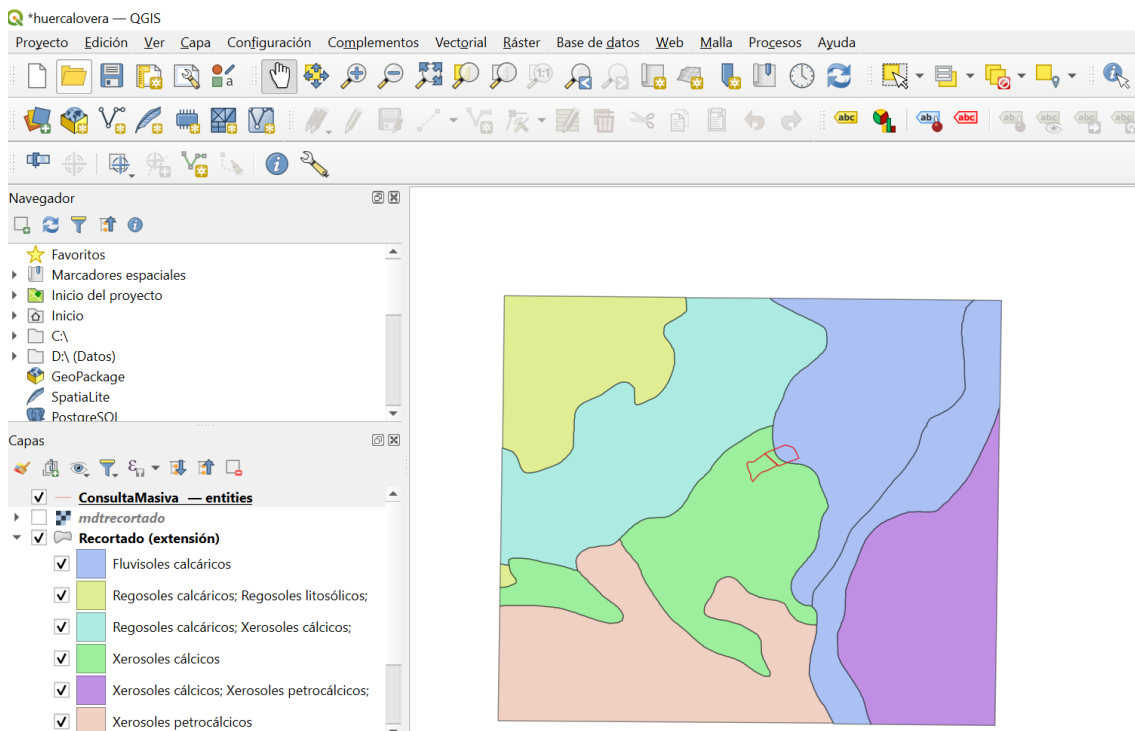


Figura 11 Suelos del entorno de las parcelas seleccionadas (Fuente: LUCDEME)

Con cierta frecuencia necesitamos que aparezca una imagen de satélite para tomar referencias o hacer medidas. En este caso, necesitamos que el sistema de referencia sea compatible con la imagen de satélite. Normalmente los mapas descargados de REDIAM tienen un sistema de referencia EPSG 23030, que es compatible con el que lleva la foto satélite.

Ahora hay que encontrar los datos concretos de los suelos que puedan ser de interés para la parcela objeto de proyecto. En este caso los suelos denominados *Xerosoles cálcicos* y *Fluvisoles calcáricos*. Es necesario buscar en la documentación de **LUCDEME** esta información o bien localizar algún análisis de suelos de la zona.

Por ejemplo, para el *Xerosol cálcico* se obtiene:

Tabla 1 Resultados para un perfil tipo de *Xerosol cálcico* (Fuente: **LUCDEME**)

Horizonte	Profundidad	Arena	Limo	Arcilla	Grava	θ_{cc}	θ_{pmp}
	cm	%	%	%	%	%	%
Ap	0-22	27,25	52,40	20,34	1,0	32,96	14,85
Bw1	22-38	41,21	39,57	19,22	1,3	28,03	13,69
Bw2	38-54	27,02	45,80	27,19	5,2	28,67	13,21
BCK	54-85	34,30	41,55	24,15	27,6	22,64	10,14
Ck	85-100	28,98	49,07	21,95	26,5	21,64	8,12

Tabla 2 Resultados para un perfil tipo de *Fluvisol calcárico* (Fuente: **LUCDEME**)

Horizonte	Profundidad	Arena	Limo	Arcilla	Grava	CIC
	cm	%	%	%	%	Meq/100g
Ap	0-45	81,2	7,4	9,0	33,4	35,0
A/C	45-120	22,8	15,5	61,65	63,4	22,3
C1	120-150	77,3	14,3	8,2	55,4	22,6
C2	>150	46,9	24,0	28,2	71,5	31,4

Será necesario buscar la textura, capacidad de intercambio catiónico (si está disponible), Capacidad de campo y punto de marchitez (si están disponibles). Si se dispone al menos de la textura, se puede aplicar la función de transferencia de Brakensiek y Rawls (1983), para obtener los parámetros de la curva de retención. Es posible obtener un dato para cada horizonte del suelo. Para este trabajo solamente utilizaremos los del horizonte superior del suelo dominante.

Tabla 3 Resumen de características de los suelos encontrados

	arcilla	arena	Z	Grava
	%	%	m	%
Xerosol cálcico	20,34	27,26	0,22	1,0
Fluvisol cálcico	9,00	83,60	0,45	33,4

En las tablas del Anexo I, obtenidas a partir de Brakensiek y Rawls (1983), se buscan los parámetros necesarios.

Tabla 4 Propiedades hidráulicas de los suelos encontrados

parámetro	unidades	Xerosol cálcico	Fluvisol calcárico
δ_a	g/cm ³	1,421	1,385
θ		0,460	0,378
ψ_b	cm	39,490	4,770
λ		0,317	0,398
θ_r		0,078	0,062
k_s	cm/h	0,262	24,095

Que nos permite obtener las curvas de retención

Tabla 5 Curvas de retención de los suelos encontrados

θ	ψ (m)	Xerosol cálcico	θ	ψ (m)	Fluvisol calcárico
0,4609	0,4		0,3782	0,0	
0,4291	0,5		0,3519	0,1	
0,3972	0,7		0,3257	0,1	
0,3653	1,0		0,2994	0,1	
0,3335	1,4		0,2731	0,1	
0,3016	2,2		0,2469	0,2	
0,2698	3,5		0,2206	0,3	
0,2379	6,2		0,1943	0,4	
0,2060	12,6		0,1680	0,8	
0,1742	31,3		0,1418	1,6	
0,1423	112,4		0,1155	4,3	

De donde podemos extraer los valores a capacidad de campo y en punto de marchitez permanente.

Es preciso saber la lámina que entraría para un suelo de 1m y la lámina para el intervalo de manejo del tensiómetro. En caso de manejar el suelo mediante tensiómetros entre 15 y 40 cb, la lámina a aplicar sería de 48 mm y 30 mm respectivamente. Estos datos serán luego necesarios para manejar el programa **CROPWAT**.

Es también de interés determinar la fracción del agua que es fácilmente disponible. En este caso hemos decidido que es el agua comprendida entre los 15 y los 40 cb, entonces

$$p = \frac{\theta_{cc} - \theta_{40cb}}{\theta_{cc} - \theta_{pmp}}$$

Ecuación 1

Tabla 6 propiedades de los suelos para incluir en CROPWAT

Parámetro	Xerosol cálcico	Fluvisol calcárico
Z(mm)	220	450
θ_{cc}	0,331	0,142
θ_{pmp}	0,1065	0,0682
θ_{40cb}	0,262	0,1170
H(m)	0,319	0,102
$H_{(15-40cb)}$ (mm)	48,64	30,47
P (% agua útil entre cc y 40cb)	30,73	33,87

En caso de tener tiempo disponible o ser necesaria una mayor precisión se pueden medir directamente sobre muestras estas propiedades del suelo. El procedimiento para hacerlo se detalla en los anexos II, III y IV.

4. Obtención y manipulación de los datos climáticos

Para el cálculo de las necesidades hídricas de los cultivos es fundamental el manejo y preparación de datos climáticos. Los organismos oficiales suelen proporcionar datos a través de Internet y es frecuente que se encuentren ya preparados para su uso en el cálculo de las necesidades de los cultivos.

En numerosas ocasiones estos modelos exigen el uso de datos en un formato muy concreto y se hace necesario transformar el juego de datos para presentar unos valores adecuadamente promediados en los períodos y formatos permitidos.

Obtención de datos del SAR de la Junta de Andalucía

Se procede a buscar las palabras clave “Estaciones agroclimáticas”. Aparecerá en el buscador un resultado como



Figura 12 Pantalla de entrada a las estaciones agroclimáticas del SAR

Los datos suelen estar colocados en páginas bajo el epígrafe de “datos agroclimáticos” o un término similar. El procedimiento más cómodo será incluir estos términos en una búsqueda y seleccionar el juego de datos que convenga

Por razones de proximidad se va a estudiar el juego de datos de la estación de Almería-Huércal Overa, de la Junta de Andalucía.

Bastará con seleccionar la estación de Almería para que se muestre la pantalla en la que se tienen los datos generales de la estación y deja escoger entre datos históricos (nuestro objetivo) y último dato seleccionado.

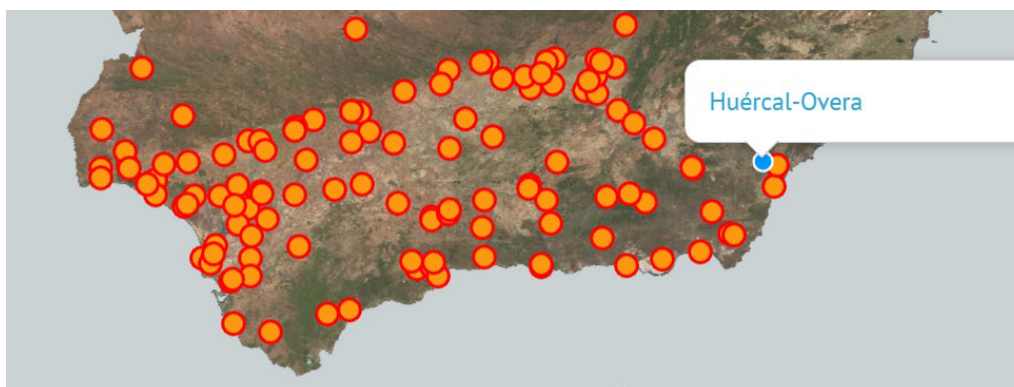


Figura 13 Selección de una estación agroclimática

Entramos en el enlace y podemos ver los datos generales de la estación

Datos de la estación

Estación Meteorológica de Huércal-Overa

Provincia: Almería
Código de Estación: 7
Primer día registrado: 21-12-1999
Último día registrado: 02-10-2023
Datos Localización
Latitud: 37° 24' 44" N
Longitud: 01° 53' 03" W
Altitud: 303
Coordenadas UTM
X: 598735
Y: 4141210

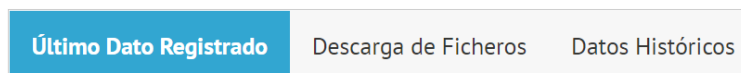


Figura 14 Datos generales de la estación

Podemos guardar esta información por si más adelante es necesaria pero lo más importante es descargar ficheros. Pulsamos dicha opción y nos ofrecerá la posibilidad de seleccionar fechas concretas.

Para un análisis climático es preferible contar con el máximo de datos así es que marcamos la serie completa. Podemos copiar y pegar los datos deseados, pero es posible descargar la información en formato CSV

En caso de usar la opción de copiar y pegar, previamente habremos preparado una hoja *Excel* en blanco para acoger los datos que copiaremos. Es posible marcar solamente un trozo de la serie y es más seguro seleccionar la opción **ver datos**, ya que es frecuente el cambio de formato y el tipo de archivo exportado con otras opciones.



Fecha Inicio
 Fecha Fin

<input checked="" type="checkbox"/> Temperatura Máxima	<input checked="" type="checkbox"/> Humedad Máxima	<input checked="" type="checkbox"/> Dirección del Viento
<input checked="" type="checkbox"/> Temperatura Mínima	<input checked="" type="checkbox"/> Humedad Mínima	<input checked="" type="checkbox"/> Precipitación
<input checked="" type="checkbox"/> Temperatura Media	<input checked="" type="checkbox"/> Humedad Media	<input checked="" type="checkbox"/> ETo
<input checked="" type="checkbox"/> HH:MM Temperatura Máxima	<input checked="" type="checkbox"/> Radiación	<input checked="" type="checkbox"/> Marcar Todas
<input checked="" type="checkbox"/> HH:MM Temperatura Mínima	<input checked="" type="checkbox"/> Velocidad del Viento	

Figura 15 Datos disponibles y selección de la descarga

Si decidimos descargar como CSV, marcamos la opción **Marcar todas** y **descargar_datos**.

Es frecuente que exista un conflicto entre el sistema de puntuación decimal en los datos importados y el de nuestro ordenador. Por defecto los datos vendrán con los decimales separados por puntos. Se comprueba si en nuestro ordenador el marcador es **.** o **,** y si fuese necesario se cambian los puntos por comas.

Puede que debamos seleccionar series muy largas de datos. La técnica para marcar una serie muy larga es también necesaria ya que si se pretende marcar con el ratón es fácil que se bloquee el programa.

- Se seleccionan con el ratón unas pocas filas de la tabla a copiar.
- Sin pulsar ninguna otra tecla o hacer clic con el ratón se usa el *Scroll* vertical para bajar hasta el final de la tabla en su parte derecha (si no se ve directamente aparecerá un *Scroll* horizontal al final de la misma).
- Situando el ratón el último dato de la derecha se pulsa **↑** y se hace **click** con el botón izquierdo del ratón.
- Quedará marcada toda la serie y se podrá copiar y pegar en la hoja *Excel*.

Conviene copiar también el encabezado para saber qué dato y en qué unidades está. El resultado es nuestra serie copiada.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
	FECHA	DIA JULIANO	TEMP. MAX. (°C)	HH:MM TEMP. MÁX.	TEMP. MIN. (°C)	HH:MM TEMP. MÍN.	TEMP. MEDIA (°C)	HUMEDAD REL. MAX. (%)	HUMEDAD REL. MIN. (%)	HUMEDAD REL. MEDIA (%)	VEL. VIENTO MEDIA (m/s)	DIR. VIENTO MEDIA (°)	RADIACION SOLAR (MJ/m²/día)	PRECIPITACION (mm)	ETo (mm/día)
1															
2	31/01/2000	31	13.7	17:40	6.9	21:59	8.8	92.2	72.7	87.5	0.1	305.6	0.0	0.0	0.5
3	01/02/2000	32	16.2	14:29	5.8	2:52	12.0	95.8	62.7	83.8	0.6	102.6	11.0	0.0	1.21
4	02/02/2000	33	18.2	15:37	6.6	7:10	13.2	96.3	63.6	85.9	0.7	148.7	13.4	0.0	1.43
5	03/02/2000	34	19.9	12:35	10.7	0:49	15.2	90.2	51.7	68.6	1.3	335.9	13.8	0.0	1.92

Figura 16 Aspecto general de los datos descargados

Hay que marcar todas las columnas que deseamos transformar.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
	FECHA	DIA JULIANO	TEMP. MAX. (°C)	HH:MM TEMP. MÁX.	TEMP. MIN. (°C)	HH:MM TEMP. MÍN.	TEMP. MEDIA (°C)	HUMEDAD REL. MAX. (%)	HUMEDAD REL. MIN. (%)	HUMEDAD REL. MEDIA (%)	VEL. VIENTO MEDIA (m/s)	DIR. VIENTO MEDIA (°)	RADIACION SOLAR (MJ/m²/día)	PRECIPITACION (mm)	ETo (mm/día)
	31/01/2000	31	13.7	17:40	6.9	21:59	8.8	92.2	72.7	87.5	0.1	305.6	0.0	0.0	0.5
	01/02/2000	32	16.2	14:29	5.8	2:52	12.0	95.8	62.7	83.8	0.6	102.6	11.0	0.0	1.21
	02/02/2000	33	18.2	15:37	6.6	7:10	13.2	96.3	63.6	85.9	0.7	148.7	13.4	0.0	1.43
	03/02/2000	34	19.9	12:35	10.7	0:49	15.2	90.2	51.7	68.6	1.3	335.9	13.8	0.0	1.92
	04/02/2000	35	19.2	12:47	10.3	5:02									2.47
	05/02/2000	36	21.3	12:34	9.6	22:29									3.32
	06/02/2000	37	17.2	13:32	8.5	6:20									2.15
	07/02/2000	38	18.4	13:16	7.8	7:11									1.59
	08/02/2000	39	18.4	14:01	8.8	5:44									1.79
	09/02/2000	40	20.7	10:52	8.2	6:17									1.89
	10/02/2000	41	17.4	12:03	10.5	7:06									2.0
	11/02/2000	42	17.8	13:21	8.2	5:09									1.77
	12/02/2000	43	18.5	14:15	7.9	2:40	13.6	91.9	49.2	76.3	0.9	268.2	13.9	0.0	1.8

Figura 17 Cambiar puntos por comas para adecuar el sistema de decimales

Ahora ya estamos en condiciones de calcular los promedios. Lo primero que hacemos es poner sendas columnas auxiliares conteniendo el mes y año de la fecha que indica la columna A. Las funciones que se utilizan son `=mes(A2)` y `=año(A2)`, una vez hecho esto se copian y pegan en toda la serie.

	FECHA	DIA JULIANO	TEMP, MAX, (°C)	HH:MM TEMP, MÁX,	TEMP, MIN, (°C)	HH:MM TEMP, MÍN,	TEMP, MEDIA (°C)	HUMEDAD REL, MAX, (%)	HUMEDAD REL, MIN, (%)	HUMEDAD REL, MEDIA (%)	VEL, VIENTO MEDIA (m/s)	DIR, VIENTO MEDIA (°)	RADIACION SOLAR (MJ/m ² día)	PRECIPITACION (mm)	ET _o (mm/día)	mes	año
1																	
2	31/01/2000	31	13,7	17:40	6,9	21:59	8,8	92,2	72,7	87,5	0,1	305,6	0	0	0,5	=MES(A2)	=AÑO(A2)
3	01/02/2000	32	16,2	14:29	5,8	2:52	12	95,8	62,7	83,8	0,6	102,6	11	0	1,21		
4	02/02/2000	33	18,2	15:37	6,6	7:10	13,2	96,3	63,6	85,9	0,7	148,7	13,4	0	1,43		

Figura 18 Determinación del año, mes y día a partir de la fecha

Ahora prepararemos la media mensual de todas las variables que proporciona la tabla. En primer lugar ponemos los números correspondientes a cada mes del año (1,2,...11, 12) en una columna auxiliar.

Después preparamos la función `promedio.si()`. Utilizaremos los identificadores `$` para fijar las variables que deseamos que permanezcan constantes al copiar y pegar. `=PROMEDIO.SI(P2:P5582;$R2;C$2:C$5582)`

N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W
PRECIPITACION (mm)	ET _o (mm/día)	mes	año	media mensual	TEMP, MAX, (°C)	HH:MM TEMP, MÁX,	TEMP, MIN, (°C)	HH:MM TEMP, MÍN,	TEMP, MEDI
0	0,5	1	2000	1	<code>=promedio.si(\$P\$2:\$P\$5582;R2;C\$2:C\$5582)</code>				
0	1,21	2	2000	2					
0	1,43	2	2000	3					
0	1,92	2	2000	4					
0	2,47	2	2000	5					
0	3,32	2	2000	6					
0	2,15	2	2000	7					

Figura 19 Uso de la función `promedio.si`

- La primera columna de datos especifica que es lo que se va a comprobar, en este caso el mes al que corresponde cada fila.
- El segundo dato es el mes que se va a calcular en esta casilla
- La tercera serie es la columna en donde están los datos que se van a promediar, en este caso la columna “C”.

Obsérvese que delante de la “C” no hay marcador `$`, ya que deseamos que esa letra cambie cuando copiemos la función a lo largo de la fila, hacia la derecha. Sin embargo, los límites de la serie no cambiarán al copiar a lo largo de la columna ya que sí se ha fijado el número inicial y final de la serie.

El resultado final es la media mensual de todas las variables. Es necesario hacer notar que para las variables pp y ET_o, será conveniente usar la función `Sumar.si`.

Como los años primero y último estarán incompletos se marcan para no utilizarlos por error.

En el ejemplo, se va a utilizar la estación de Huercal-Overa y los resultados medios para los años naturales son:

Tabla 7 Datos medios del año natural

Año	T _{Max} °C	T _{Min} °C	T _{Med} °C	HR _{Media} %	Vel _{Viento} m/s	Rad MJ/m ² /d	Pp mm	ETo mm	la
1999	16,6	3,2	9,3	70,5	1,9	7,6	19,2	18,1	1,06
2000	23,7	9,5	16,6	64,7	1,3	18,2	263,0	1282,3	0,21
2001	23,9	10,5	17,3	62,5	1,5	18,4	218,8	1332,3	0,16
2002	23,6	10,1	16,8	62,9	1,4	18,4	278,4	1287,1	0,22
2003	23,4	10,5	17,0	62,5	1,4	18,0	343,4	1285,2	0,27
2004	23,2	10,1	16,6	63,3	1,3	17,8	418,8	1239,6	0,34
2005	22,9	9,2	16,0	61,5	1,3	18,6	211,6	1280,0	0,17
2006	23,5	10,6	17,0	63,2	1,3	17,6	347,2	1256,1	0,28
2007	23,2	9,5	16,3	63,2	1,3	18,2	323,2	1244,4	0,26
2008	22,8	9,5	16,1	61,5	1,4	18,1	269,6	1279,9	0,21
2009	23,5	9,1	16,3	61,4	1,4	18,4	331,8	1302,8	0,25
2010	22,3	9,1	15,7	65,2	1,3	17,8	375,6	1228,8	0,31
2011	23,3	10,2	16,7	70,5	1,3	17,2	279,6	1194,3	0,23
2012	23,6	9,4	16,5	65,2	1,3	18,5	433,6	1275,5	0,34
2013	23,1	9,5	16,2	64,4	1,5	18,3	126,4	1274,8	0,10
2014	24,3	10,5	17,3	62,9	1,4	18,9	98,0	1336,1	0,07
2015	23,9	10,5	17,0	66,1	1,3	18,4	209,0	1265,6	0,17
2016	23,5	10,4	17,0	65,7	1,4	18,2	292,4	1283,2	0,23
2017	24,2	9,8	16,8	65,5	1,1	17,9	208,6	1153,7	0,18
2018	23,7	9,8	16,6	64,0	1,3	18,6	192,5	1262,3	0,15
2019	23,8	9,6	16,6	62,7	1,7	18,6	283,2	1366,8	0,21
2020	23,8	10,0	16,8	67,2	1,6	17,3	247,0	1292,4	0,19
2021	23,3	10,8	16,9	68,6	1,6	17,5	323,4	1244,7	0,26
2022	24,5	10,8	17,5	63,8	1,4	17,3	379,8	1294,2	0,29
2023	25,6	11,6	18,6	62,3	1,6	21,4	260,2	1174,2	0,22
media anual	23,5	9,9	16,7	64,3	1,4	18,1	280,6	1272,3	0,22

Podemos analizar la distribución de la precipitación y de la evaporación, como variables importantes en lo que respecta al riego.

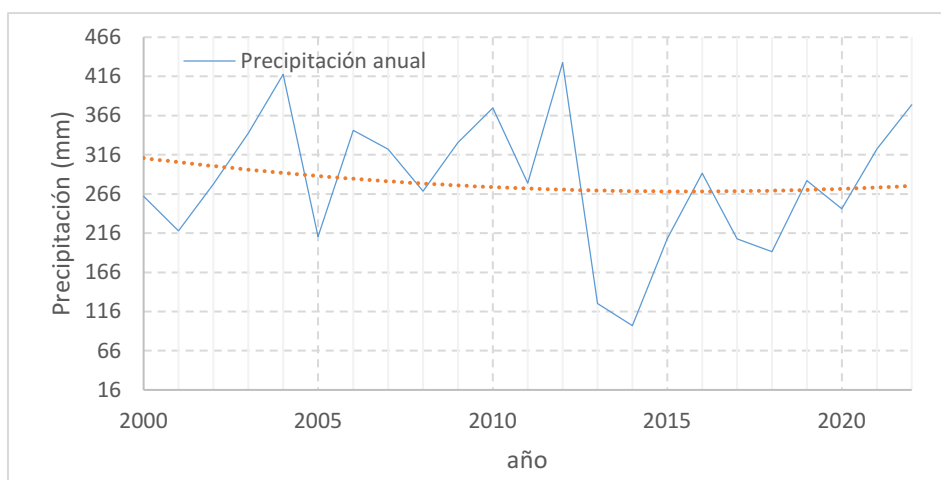


Figura 20 Evolución de la precipitación anual y tendencia

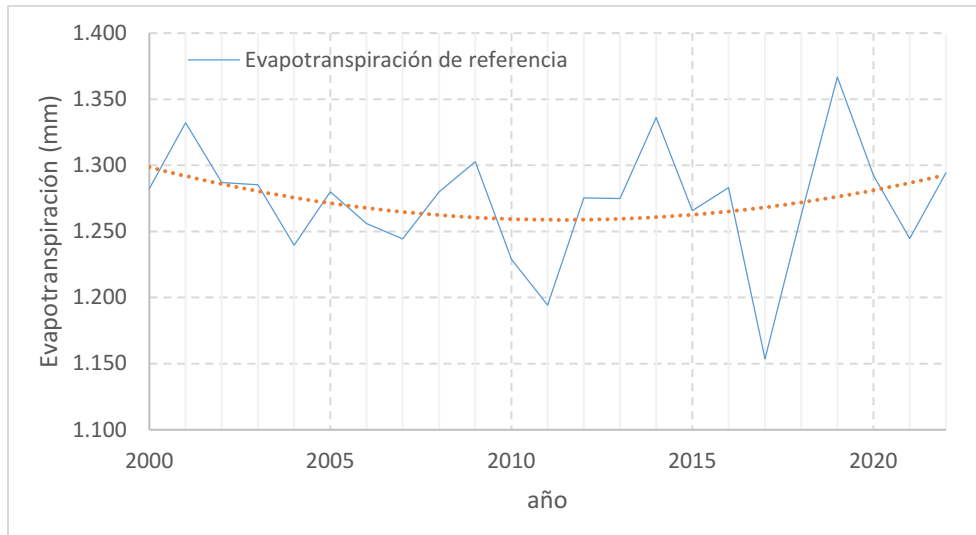


Figura 21 Evolución de la Evapotranspiración anual y tendencia

Particular atención merece la clasificación de aridez de esta zona. El índice de aridez normalizado ($I_a = P/ET_0$) muestra la evolución que se observa en la Figura 22.

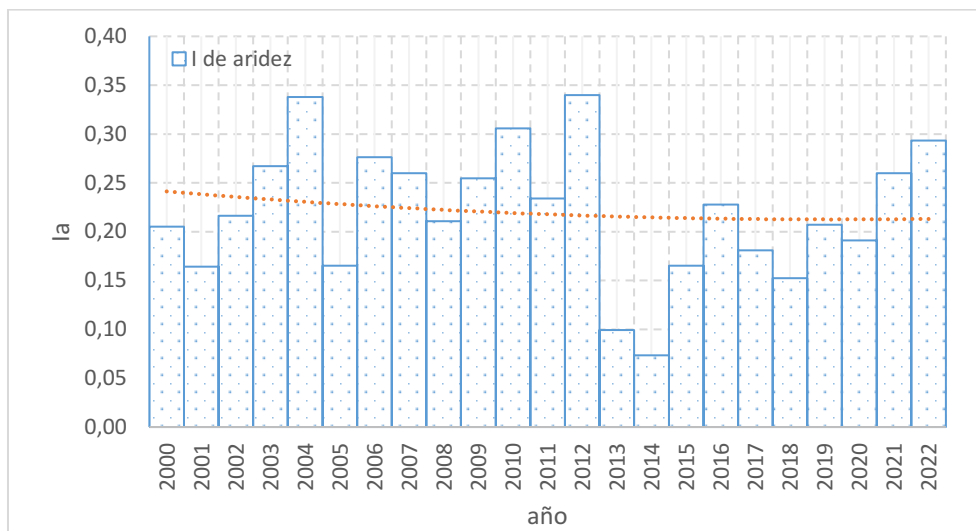


Figura 22 Evolución del índice de aridez y tendencia

Vemos que el clima es árido ($I_a < 0,2$) en la mitad de los años y semiárido la otra mitad ($I_a > 0,2$). La tendencia es hacia una mayor aridez, con menos precipitación, aunque con menos evaporación.

En realidad, la media suaviza cualquier serie, como se puede comprobar al comparar un año cualquiera con el año medio.

Para identificar el **año mediana**, escogemos la variable que nos servirá de referencia, en este caso la precipitación y se ordena la serie con de menor a mayor valor.

Tabla 8 Obtención del año mediana considerando la precipitación

n	probabilidad	año	Precipitación (mm)	Evapotranspiración (mm)
		1999	19,2	18,1
1	0,023	2014	98,0	1336,1
2	0,065	2013	126,4	1274,8
3	0,106	2018	192,5	1262,3
4	0,148	2017	208,6	1153,7
5	0,189	2015	209,0	1265,6
6	0,231	2005	211,6	1280,0
7	0,272	2001	218,8	1332,3
8	0,313	2020	247,0	1292,4
9	0,355	2023	260,2	1174,2
10	0,396	2000	263,0	1282,3
11	0,438	2008	269,6	1279,9
12	0,479	2002	278,4	1287,1
13	0,521	2011	279,6	1194,3
14	0,562	2019	283,2	1366,8
15	0,604	2016	292,4	1283,2
16	0,645	2007	323,2	1244,4
17	0,687	2021	323,4	1244,7
18	0,728	2009	331,8	1302,8
19	0,769	2003	343,4	1285,2
20	0,811	2006	347,2	1256,1
21	0,852	2010	375,6	1228,8
22	0,894	2022	379,8	1294,2
23	0,935	2004	418,8	1239,6
24	0,977	2012	433,6	1275,5

Se ha desechado el año 1999 por faltarle muchos datos. El dato que queda en el centro es la mediana, que corresponde con una probabilidad del 50% y ésta puede ser calculada mediante la expresión

$$P = \frac{m - 0,44}{n + 0,12}$$

Ecuación 2

Si necesitamos una precipitación típica elegiríamos la del año 2002 o la del año 2011. Conviene identificar el **año mediana** de la serie por si necesitamos utilizar datos diarios. La precipitación, con su comportamiento fuertemente estocástico, no queda bien representada por la media y será mejor escoger un año típico, como es el **año mediana**. Un ejemplo de este comportamiento lo podemos ver en la Figura 23

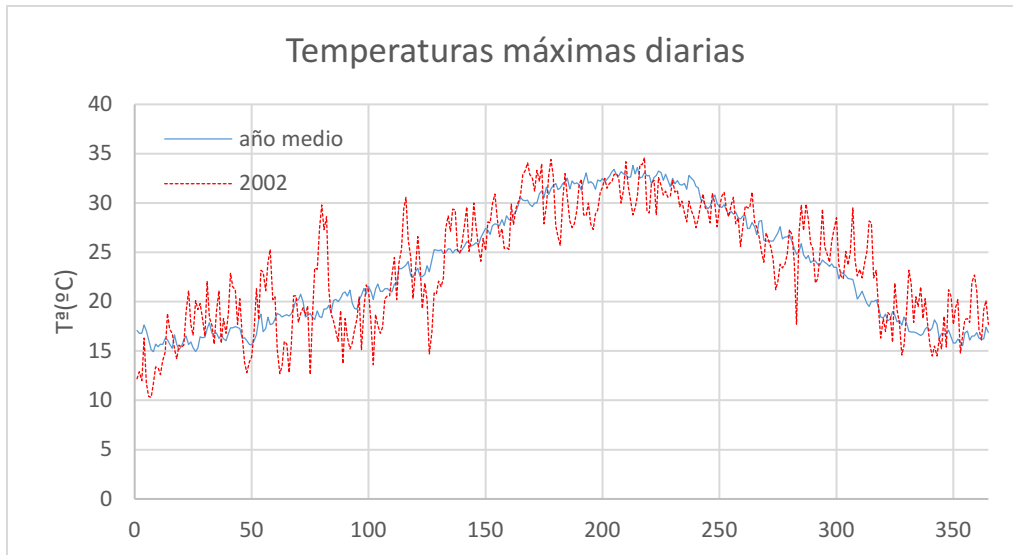


Figura 23 Evolución de la temperatura máxima diaria en un año cualquiera y en el año promedio

También podemos hacer el promedio mensual ya que algunos modelos trabajan con datos medios mensuales.

Tabla 9 Valores mensuales medios

mes	T _{Max} °C	T _{Min} °C	T _{Med} °C	HR _{Med} %	V _{Viento} m/s	Rad MJ/m ² /d	Precip mm/año	ET _o mm/año
1	16,02	2,41	8,82	70,04	1,39	9,90	24,23	45,62
2	16,96	3,58	10,08	66,07	1,58	12,76	13,78	59,05
3	19,28	6,00	12,60	63,73	1,67	16,80	43,19	92,58
4	21,54	8,30	14,98	62,02	1,56	21,08	31,25	115,54
5	25,15	11,25	18,51	58,58	1,43	24,94	26,44	149,93
6	29,70	15,17	22,89	52,94	1,47	27,88	7,31	178,36
7	32,35	17,77	25,37	55,87	1,45	27,43	3,48	191,51
8	32,28	18,20	25,35	59,20	1,35	24,15	6,30	168,30
9	28,41	15,55	21,82	67,66	1,18	18,99	40,89	114,96
10	24,66	11,19	17,55	71,86	1,01	14,10	26,49	76,49
11	19,19	6,36	12,47	70,56	1,28	10,39	31,89	49,66
12	16,67	3,52	9,67	73,09	1,29	8,67	29,20	39,70

Es necesario tener en cuenta que la precipitación es la media diaria y solemos contabilizar la suma mensual. Para arreglar este aspecto multiplicaremos cada resultado por el número de días que tiene cada mes.

También se puede utilizar la función `Promedio.si.conjunto` si queremos imponer más de una condición como por ejemplo promedios mensuales del año 2002 o los datos diarios. Se muestra un ejemplo de la función utilizada para seleccionar el dato diario. En este caso, para evitar que se produzca un error en el caso de no existir un dato que reúna todas las condiciones, será preferible usar la función `sumar.si.conjunto`.

```
=SUMAR.SI.CONJUNTO('Huercal-Overa'!$O$2:$O$8667;  
'Huercal-Overa'!$P$2:$P$8667; et!$A$2;'Huercal-Overa'!$Q$2:$Q$8667;et!$A3;  
'Huercal-Overa'!$R$2:$R$8667;et!B$2)
```

Que permitirá preparar los datos tal y como los va a pedir el programa **CROPWAT**. Como es lógico, se selecciona uno de los dos años que cumplen- que son mediana de la serie.

2011	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
1	0.90	1.00	1.00	0.80	0.90	1.10	1.10	1.20	1.40	1.50	2.40	1.60	1.10	1.10	1.20	0.90	1.10	0.80	0.90	1.00	1.20	0.90	1.10	1.30	0.70	0.80	0.80	0.80	1.60	1.20	1.40
2	1.20	1.70	1.40	1.50	1.50	1.60	1.50	1.70	1.50	1.40	1.40	1.70	1.80	2.90	2.40	2.80	3.30	2.90	2.00	2.90	4.20	4.30	2.80	2.40	2.20	3.60	2.00	2.80	0.00	0.00	0.00
3	2.30	2.20	2.00	1.50	1.50	2.10	2.70	2.30	1.30	1.10	0.70	1.90	2.70	2.00	2.80	4.10	4.00	3.00	3.10	2.80	1.90	2.30	1.80	1.90	2.20	2.80	4.20	4.10	2.60	3.50	3.70
4	3.70	3.60	2.90	3.80	2.90	4.90	4.60	4.30	5.20	5.00	3.70	3.90	4.30	4.50	3.50	2.70	3.90	3.30	2.20	3.80	2.50	3.10	3.20	2.10	2.20	3.60	4.20	4.40	2.00	2.70	0.00
5	3.10	1.60	3.70	3.60	4.50	4.10	4.00	4.70	4.80	4.90	5.00	4.50	4.60	5.40	1.80	3.80	4.00	2.40	3.60	2.80	4.90	5.00	5.20	5.60	5.50	4.60	4.70	5.20	4.40	4.80	4.80
6	2.80	2.90	3.40	4.80	5.00	4.00	4.60	5.70	5.50	5.80	4.90	5.70	6.40	5.80	5.80	6.70	6.40	7.20	6.00	5.60	6.00	5.80	5.50	5.20	5.90	6.20	6.10	6.30	5.70	5.40	0.00
7	5.20	6.40	5.90	6.40	6.50	6.80	7.30	6.60	5.50	4.90	5.10	4.40	6.50	5.40	5.40	5.90	6.90	4.40	7.00	6.00	5.90	5.30	3.80	5.60	5.40	6.00	6.20	4.10	5.30	5.10	5.30
8	5.60	5.60	6.20	5.70	5.20	6.00	6.80	6.70	5.20	4.50	5.00	5.50	5.80	6.00	6.00	5.50	5.70	5.70	5.30	6.00	5.80	5.00	5.30	5.60	5.90	5.90	5.10	3.80	4.00	5.80	5.20
9	4.90	1.80	4.00	4.60	4.70	4.30	4.70	4.60	4.70	4.60	4.50	4.70	4.40	4.70	4.20	4.10	3.70	4.70	3.80	3.60	3.50	3.50	2.60	3.50	3.50	3.50	3.50	3.20	2.70	2.80	0.00
10	3.10	3.20	2.90	2.90	3.00	3.10	3.10	3.00	2.70	2.80	2.80	3.10	3.10	2.90	2.40	2.00	1.60	2.20	2.20	2.00	2.20	1.30	1.80	1.20	2.40	1.90	1.30	1.40	2.00	1.90	1.70
11	1.80	0.90	1.70	1.00	2.30	3.40	1.80	1.60	1.40	1.50	1.50	1.90	2.30	1.40	2.00	1.40	1.40	0.80	1.10	1.10	1.40	1.90	1.10	1.10	1.60	1.40	1.30	1.20	1.00	0.90	0.00
12	0.70	1.20	0.80	0.90	1.00	1.00	0.90	0.90	0.70	0.80	1.10	1.30	1.20	1.40	1.40	2.50	2.00	1.00	1.00	1.10	1.60	1.10	1.00	1.20	0.80	0.70	1.10	1.00	1.00	1.00	1.30

Figura 24 Aspecto de tabla de datos diarios de ET₀ (mm/día)

2011	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	
1	1.20	0.00	0.00	0.20	0.20	0.00	0.00	0.00	0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.20	0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.20	0.00	0.00	0.00	0.40	5.00	8.80	0.60	0.20	0.20	8.20	
2	0.00	0.00	0.00	0.20	0.00	0.20	0.00	0.20	0.20	0.00	0.20	0.00	0.20	0.40	1.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.80	0.00	0.00	0.00	0.00	
3	0.00	0.00	0.60	2.00	5.80	0.00	0.00	0.00	2.00	0.80	11.40	1.60	0.00	6.40	0.80	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.40	5.00	1.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.20	0.00	0.00	
4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.20	0.00	1.60	0.20	2.00	9.80	16.00	6.00	0.20	0.00	5.00	1.20	0.00	
5	1.20	6.00	0.60	0.00	0.20	0.00	3.80	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.20	0.00	0.20	0.20	0.00	5.00	0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.20	0.00	0.00	
6	9.40	0.80	0.00	0.00	0.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
8	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
9	0.60	36.40	0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.20	0.00	0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	6.60	0.00	0.20	0.00	0.00	0.00	0.20	0.20	0.00	0.00
10	0.00	0.00	0.00	0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.20	0.00	0.00	0.20	0.00	3.40	0.20	0.00	1.20	3.00	0.00	0.00	0.00	0.00
11	0.00	0.20	2.40	11.80	0.00	0.00	0.00	0.00	0.20	0.00	0.00	0.20	0.00	1.00	0.20	0.00	0.40	32.60	1.80	6.60	3.40	0.00	0.00	3.60	0.20	0.20	0.00	0.20	0.20	0.00	0.00	0.00
12	0.00	2.80	13.80	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.00	0.20	0.20	0.00	0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.20	0.20	0.00	0.00	1.60	0.20	0.00	0.00	0.20	0.00	0.00

Figura 25 Aspecto de tabla de datos diarios de Precipitación (mm/día)

Obtención de la ET₀ en invernadero

Frecuentemente necesitamos manejar datos del interior de un invernadero, pero no se dispone de ellos. Algunos autores (Fernandez et al, 2010)) han utilizado con éxito correlaciones, a partir de la radiación solar en el exterior de la instalación, para obtener la ET₀ en el interior del invernadero.

Las ecuaciones propuestas por estos autores son:

$$\text{Si } DJ \leq 220 \quad ET_0 = R_{s_{inv}} (0,288 + 0,0019 \cdot DJ)$$

$$\text{Si } DJ > 220 \quad ET_0 = R_{s_{inv}} \cdot (1,339 - 0,00288 \cdot DJ)$$

Ecuación 3

Con DJ día juliano

$$R_{s_{inv}} = R_{s_{exterior}} \cdot T$$

T= transmisividad de la cubierta plástica. (fracción)

La radiación solar deberá estar en [mm/día]. Si viniese en [MJ/m²/día] deberemos convertirla con la expresión:

$$R_s(\text{mm/día}) = (238,85 / (597,3 - 0,57 T)) \cdot R_s(\text{MJ/m}^2/\text{día})$$

El aspecto de la evolución de la ET dentro de un invernadero tipo Almería para un año promedio sería la que se muestra en la Figura 26

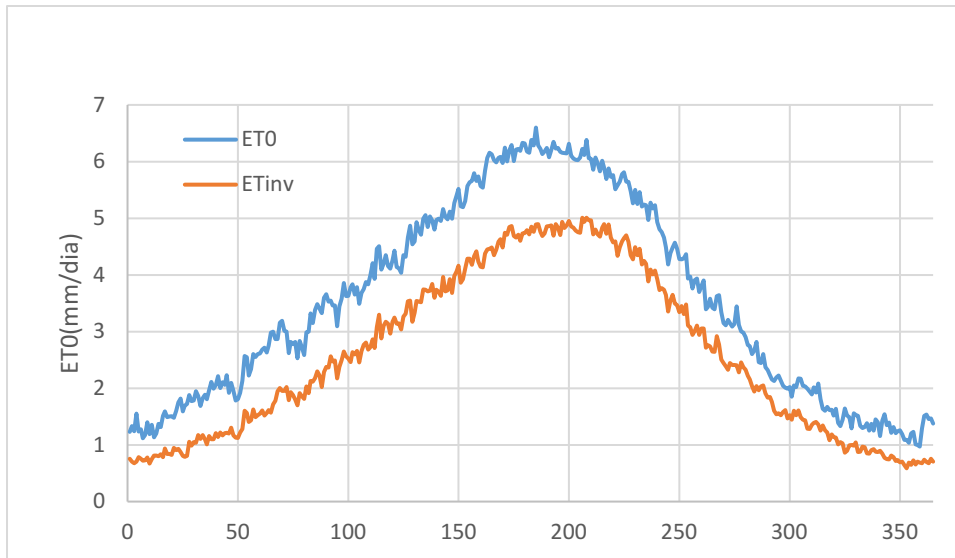


Figura 26 Comparación de la ET_0 dentro y fuera de un invernadero tipo Almería

En general se puede simplificar el problema multiplicando la ET_0 en el exterior por un factor como

$$ET_{inv} = 0,7357 \cdot ET_{ext}$$

Ecuación 4

Entonces para nuestro caso podíamos utilizar la ET_0 diaria tal y como la pide **CROPWAT** como

2011	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
1	0.62	0.47	0.78	0.68	0.68	0.78	0.61	0.83	0.56	0.92	0.96	0.95	0.96	0.98	0.97	0.85	0.94	0.46	0.43	0.95	0.81	0.92	0.27	0.09	0.13	0.32	0.44	0.55	0.87	0.94	0.93
2	1.07	1.29	1.33	1.36	1.37	1.38	1.36	1.28	1.28	1.23	1.37	1.39	1.40	1.30	0.54	1.20	1.51	1.67	1.34	1.34	1.69	1.45	1.62	1.77	1.74	1.87	0.75	1.73	0.00	0.00	0.00
3	1.87	1.91	1.46	1.20	1.00	1.76	1.85	0.53	0.23	0.43	0.18	1.18	1.98	1.49	1.71	2.22	1.92	2.38	2.26	2.21	1.18	1.03	0.69	1.23	1.54	2.26	2.59	2.42	1.77	2.21	2.77
4	2.85	2.39	1.43	2.33	1.54	2.59	2.76	2.93	3.06	3.03	2.66	3.08	3.20	3.19	2.73	1.39	3.21	2.67	1.82	3.11	1.61	2.24	2.44	1.45	1.50	2.84	3.54	3.64	0.92	2.27	0.00
5	2.58	1.01	2.68	2.77	3.78	3.07	2.70	4.00	3.95	3.90	3.66	2.94	3.46	3.95	0.70	3.02	2.91	1.47	2.50	1.86	4.24	4.25	4.36	4.35	4.28	3.11	3.08	4.09	3.13	3.69	3.56
6	1.85	2.14	2.84	4.33	4.63	3.13	3.34	4.24	4.43	4.62	4.14	4.59	4.66	4.65	4.68	4.70	4.77	4.84	4.63	4.50	4.69	4.22	4.67	4.06	4.73	4.77	4.73	4.72	4.11	4.45	0.00
7	4.02	4.74	3.87	4.97	4.90	4.98	5.04	5.05	3.96	3.54	4.05	2.46	4.95	4.52	4.67	4.97	5.01	3.35	4.95	4.83	4.83	4.18	3.00	4.63	4.63	4.88	4.75	3.32	4.81	4.63	4.71
8	4.37	4.59	4.89	4.89	4.44	4.91	4.97	4.74	4.43	3.70	4.59	4.56	4.71	4.70	4.62	4.58	4.42	4.33	4.17	4.31	4.28	4.04	4.15	4.23	4.30	4.31	3.69	2.72	2.90	3.70	3.83
9	3.85	0.89	3.59	4.13	4.05	3.87	3.98	4.03	4.01	3.89	3.69	3.70	3.69	3.68	3.51	3.50	3.06	3.20	3.09	3.27	3.16	3.09	2.11	3.10	3.07	2.87	2.87	2.52	1.52	1.77	0.00
10	2.41	2.60	2.57	2.61	2.75	2.73	2.30	2.61	2.64	2.63	2.65	2.61	2.60	2.45	1.94	1.74	1.17	2.11	1.98	1.45	1.63	0.78	1.40	0.70	1.91	1.40	0.89	0.90	1.01	1.20	1.53
11	1.65	0.58	0.83	0.61	1.68	1.71	0.97	1.61	1.60	1.53	1.49	1.18	1.04	0.74	1.45	1.44	1.02	0.28	0.93	0.57	0.69	1.05	0.55	0.35	1.08	1.20	1.05	0.52	1.10	1.10	0.00
12	0.69	0.50	0.37	1.05	1.06	1.06	1.04	0.90	0.57	0.58	0.68	0.79	0.89	0.88	0.91	0.72	0.54	0.94	0.93	0.91	0.90	0.91	0.90	0.82	0.86	0.27	0.75	0.82	0.71	0.85	0.83

Figura 27 Aspecto de tabla de datos diarios de ET_0 (mm/día) dentro de invernadero