

# Parámetros de rugosidad representativos de terrenos naturales

Maria Marrero Santana

## TUTOR

Andrew S. Kowalski

*Departamento de Física Aplicada. Universidad de Granada.*



Universidad de Granada



Tesis presentada para cumplir con los requisitos finales para la obtención del título de Máster en Geofísica y Meteorología  
Mayo 2011





## Resumen

---

La rugosidad de la superficie de la tierra continuamente sirve de sumidero de la cantidad de movimiento para el flujo atmosférico. Para la descripción, modelización y predicción del comportamiento de los vientos y la turbulencia a todas las escalas, un conocimiento adecuado de la fuerza de este sumidero es necesario para la condición límite. A grandes escalas, la rugosidad superficial influye en el desarrollo de las tormentas y de la circulación atmosférica global. A pequeña escala, cuanto más rugosa es la superficie, mayor es la mezcla turbulenta. De acuerdo con la teoría del transporte turbulento, el ritmo de mezcla no depende de la velocidad del viento sino de la gradiente vertical de la velocidad de viento. Sobre una superficie rugosa, el calor, el vapor de agua y otros gases son fácilmente transferidos, incluso cuando la velocidad del viento es baja.

Con el objetivo de caracterizar aerodinámicamente la transferencia de cantidad de movimiento y de gases se determinan la longitud de rugosidad y el coeficiente de arrastre de diferentes ecosistemas mediante la técnica “Eddy covariance”. Esto es a partir de las medidas de un único anemómetro de la velocidad del viento y la velocidad de fricción. Con ello se pudo realizar una clasificación de los diferentes ecosistemas según su rugosidad. Comprobamos que la superficie más lisa es el agua estancada y la más rugosa es el bosque. La rugosidad aumenta a medida que el cociente de la distancia relativa de los obstáculos entre la altura media de éstos disminuye, es decir, a medida que la distancia entre obstáculos disminuye y la altura de éstos aumenta. La excepción a esta regla la ponen los obstáculos flexibles capaces de doblarse por acción del viento, modificando la altura y densidad del dosel según la velocidad del viento. Otra excepción la encontramos en los parajes con topografía compleja, la cual produce remolinos.

## Tabla de contenido

<b>Introducción</b>	<b>1</b>
<b>Teoría</b>	<b>5</b>
Capa superficial atmosférica	5
Análisis dimensional y teoría de semejanza de Monin-Obukhov	6
Estabilidad atmosférica	11
<b>Experimentación</b>	<b>14</b>
<i>Datos</i>	14
Descripción de los ecosistemas	14
Descripción de las estaciones	19
<i>Método</i>	21
<b>Resultados</b>	<b>24</b>
Estudio de caso: Gádor	24
Resumen de todos los sitios	27
Perfil de viento de Las Majadas: Cálculo de $d$ y $z_0$	30
<b>Discusión</b>	<b>31</b>
<b>Conclusiones</b>	<b>36</b>
<b>Agradecimientos</b>	<b>38</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>39</b>
<b>Apéndices</b>	<b>I</b>
I. <i>Clima de los ecosistemas</i>	I
II. <i>Vegetación de los ecosistemas</i>	III
III. <i>Imágenes del Llano de los Juanes, Sierra de Gádor</i>	VII
IV. <i>Resultados del estudio estadístico</i>	VIII
Estudio cronológico del matorral en la Sierra de Gádor	VIII
Estudio de todas las estaciones según sus fenologías	IX



## Introducción

### Motivación

La capa límite atmosférica representa una pequeña fracción de la atmósfera, comprende, aproximadamente, el primer kilómetro de la atmósfera. Los procesos de pequeña escala que en ella ocurren son provechosos para muchas de las actividades humanas y, además, son importantes para la existencia y supervivencia de la vida en la tierra.

El aire en esta capa está en continuo movimiento turbulento causando un eficiente intercambio de calor sensible y de calor latente, de cantidad de movimiento y de masa entre la superficie terrestre y la atmósfera, y, por tanto, moderando el microclima próximo al suelo.

El aire en contacto con el suelo es desacelerado por las fuerzas de arrastre. Hay dos tipos de arrastre, el debido a los esfuerzos tangenciales se denomina “arrastre viscoso” y el “arrastre de presión” causado por un gradiente de presión en la superficie de los obstáculos. Éste es lo suficientemente grande como para producir una estela en la parte posterior del cuerpo, reduciéndose la presión en esta zona, lo que se manifiesta como una fuerza neta de arrastre de presión. Esta desaceleración produce fricción, es decir, una diferencia de velocidades entre el aire y la superficie y entre las diferentes capas de aire, que provoca cizalladuras en el flujo del aire. El efecto de la fricción sobre la cizalla es acelerar el aire más lento y desacelerar el más rápido, esto se traduce en una transferencia vertical de la cantidad de movimiento hacia abajo desde la atmósfera a la tierra. La cantidad de movimiento se transfiere debido a que se transporta aire a través de la cizalla, esto ocurre a dos escalas, la molecular y la turbulenta. Generalmente, la transferencia molecular es despreciable frente a la turbulenta, la cual consiste en la entremezcla de remolinos hasta dispersar la cantidad de movimiento.

El arrastre, y por tanto la fricción, aumenta con la rugosidad del suelo. Entendiendo por rugosidad las características geométricas de la superficie asociadas a la eficiencia de ésta como sumidero de cantidad de movimiento del

flujo turbulento, debido a la generación de fuerzas de arrastre y el incremento de la cizalla vertical del viento. La rugosidad varía con la modificación de la superficie, la cual cambia en el espacio y en el tiempo en un ancho rango de escalas, a macroescala (creada por la diferencia entre distintas regiones geográficas), a mesoescala (como resultado de la diferencia entre distintos tipos de cobertura terrestre) y a microescala (donde la variación del dosel es resultado de un mosaico de parches de diferentes especies de vegetación) (Bohrer, 2009).

Estos cambios a gran escala modifican la circulación atmosférica a escala sinóptica y por tanto influyen en los patrones del tiempo, siendo necesario tenerlo en cuenta en los modelos climáticos y de predicción, además de en estudios de energía eólica, de agricultura y erosión del terreno. Para introducir los efectos de la rugosidad de la superficie en los diferentes modelos se utilizan diferentes parámetros, los más usuales son la altura de desplazamiento,  $d$  y la longitud de rugosidad,  $z_0$ ; y del flujo, el coeficiente de arrastre,  $C_D$  y la velocidad de fricción,  $u_*$ . La altura de desplazamiento es el nivel medio de acción de transferencia de cantidad de movimiento entre el flujo y los elementos rugosos. Mientras que la longitud de rugosidad es una escala de longitud que caracteriza la pérdida de cantidad de movimiento del viento debido a los elementos rugosos. Es la altura respecto del suelo, expresada en metros, donde la velocidad de viento es teóricamente cero al ser extrapolado logarítmico el perfil de viento. (Nakai, et al., 2008). El coeficiente de arrastre es un coeficiente adimensional que mide matemáticamente la efectividad en la transferencia de la cantidad de movimiento del viento a la superficie. La velocidad de fricción es una escala de velocidad definido como la raíz cuadrada del cociente entre el esfuerzo tangencial en la superficie y la densidad del aire. Luego se utiliza para la cuantificación de la turbulencia. Valores elevados de la velocidad de fricción implican una mayor turbulencia y por tanto una mejor mezcla.

## Contexto

Concretamente en la micrometeorología, estos parámetros son de vital importancia para estudiar la turbulencia y con ello el transporte de calor, de gases y de cantidad de movimiento. Por ejemplo, la velocidad de fricción se utiliza para



filtrar medidas tomadas cuando no hay turbulencia. Algo, también, esencial en estos estudios es determinar el footprint<sup>1</sup>, que depende de la altura de medida, la estabilidad atmosférica y la rugosidad de la superficie. De modo que una mayor altura, menor rugosidad y en atmósfera estable se tiene un mayor footprint y el pico de mayor contribución se aleja del instrumento (Schmid, 2002). Además, a mayor rugosidad,  $z_0$ , mayor es el acoplamiento entre el suelo y la atmósfera incrementándose los intercambios entre ambos sistemas. De esta forma se pueden determinar variaciones en las emisiones de gases, por ejemplo CO<sub>2</sub>, de suelo, la ventilación del suelo subterráneo y con ello modelizar los flujos turbulentos.

Debido a las circunstancias anteriormente comentadas en las últimas décadas ha aumentado el número de estudios sobre la rugosidad del suelo y la parametrización de ésta respecto a la transferencia de cantidad de movimiento. En los sesenta se relacionaron  $d$  y  $z_0$  con la altura del dosel,  $h$ , de una forma muy sencilla considerándolos meras fracciones de éstas, ej. Cowan (1968) obtuvo  $d/h=0.64$  y Tanner y Pelton (1960) obtuvieron  $z_0/h=0.13$  (Nakai, et al., 2008). Por otro lado, se llegaba a que para vientos inferiores a 15 m/s en condiciones de estabilidad neutra se podría considerar que el  $C_D$  variaba linealmente con la velocidad del viento. Pero se sabía que éste dependía de varios factores que debían tenerse en cuenta como son la dirección del viento, la existencia de ráfagas... además de las diferencias entre suelo desnudo, con vegetación y en zonas de relieve. (Garratt, 1977). Los primeros investigadores en centrarse en el efecto de la vegetación como tal, Brutsaert (1982) y Waters (2002) entre otros, propusieron algunas parametrizaciones usando propiedades del suelo (ej., altura de la vegetación, LAI (índice del área de la hoja), etc.) puesto que la turbulencia del viento está controlada por la estructura y la separación de las plantas en la superficie (Lu, et al., 2009).

En la actualidad los estudios se centran en caracterizar las superficies con una topografía compleja mediante aproximaciones o generalizando la teoría de similitud de Monin-Obukhov (Anderson & Meneveau, 2010). Y por otro lado se sigue trabajando en la caracterización de los suelos cubiertos por vegetación

---

<sup>1</sup> área en la dirección del viento “vista” por los instrumentos que miden los flujos turbulentos

teniendo en cuenta que ésta es una superficie porosa, es decir, el viento entra dentro del dosel y sopla entre las plantas y árboles. (Queck & Bernhofer, 2010).

Para conseguir una mayor coordinación y facilitar la comparación de resultados en diferentes ecosistemas se creó a principios de siglo la red global FLUXNET, la cual es una red de estaciones micrometeorológicas que utilizan métodos “Eddy covariance” para medir intercambios de energía, vapor de agua y dióxido de carbono entre la biosfera y la atmósfera. Está compuesta por diferentes redes regionales como pueden ser ASIAFLUX, AMERIFLUX, CarboEurope IP,... La mayoría de las estaciones de este estudio pertenecen a la red española Carboed-es que está integrada en la europea GHG-Europe.

### Objetivo

Nuestro objetivo es explorar la posibilidad de determinar la longitud de rugosidad y el coeficiente de arrastre para la transferencia de masa, energía y cantidad de movimiento entre la biosfera y la atmósfera. En vez de por el método tradicional consistente en utilizar medidas de perfil de viento, utilizando varios anemómetros dispuestos en vertical a diferentes alturas, usando medidas directas de viento y flujos de cantidad de movimiento y de calor.

## Teoría

### Capa superficial atmosférica

La capa límite atmosférica se forma como consecuencia de la interacción entre la atmósfera y la superficie, la escala de tiempo oscila entre una fracción de segundo y unas pocas horas. La influencia de la fricción superficial, el calentamiento terrestre, etc., se transmite rápida y eficazmente a la totalidad de la capa límite, mediante los mecanismos de transferencia o mezcla turbulenta.

La altura de la capa límite varía en un amplio rango de medidas, desde varias decenas de metros hasta un par de kilómetros, dependiendo del calentamiento de la superficie, de la fuerza del viento, de las características rugosas y topográficas de la superficie, de los movimientos verticales a gran escala y de la advección horizontal de calor y de humedad, entre otros factores.

La capa más próxima al suelo de la capa fronteriza atmosférica se denomina capa superficial atmosférica (*Atmospheric Surface Layer, SL*). En particular, se define como la capa donde los flujos turbulentos varían menos del 10% del valor que tienen en la superficie terrestre.

En la capa superficial atmosférica tienen lugar las variaciones bruscas de las variables meteorológicas con la altura y, consecuentemente, la mayoría de intercambios de cantidad de movimiento, de calor y de masa, realizados básicamente por mecanismos turbulentos.

El comportamiento de la capa superficial atmosférica muestra una fuerte variación diurna; durante las horas de sol, se caracteriza por un gradiente superadiabático, un decrecimiento de la humedad con la altura y una gran cizalla de viento. Además, la turbulencia es de carácter térmico y mecánico. Por la noche, la capa superficial atmosférica se caracteriza por una fuerte estabilidad que impide los movimientos verticales de las partículas de aire, mostrando generalmente turbulencia de carácter mecánico exclusivamente.

## Análisis dimensional y teoría de semejanza de Monin-Obukhov

Para obtener las relaciones entre los flujos turbulentos y los gradientes de las variables y propiedades del aire en la capa límite atmosférica, sin resolver complicadas ecuaciones diferenciales, se utiliza la teoría de semejanza de Monin-Obukhov mediante el llamado análisis dimensional.

### Análisis dimensional

El análisis dimensional establece relaciones útiles entre diferentes variables y parámetros, basándose en las dimensiones del problema. Se define un conjunto fundamental de dimensiones, tales como la longitud, el tiempo, la masa, etc., y se expresan las dimensiones de todas las cantidades involucradas en términos de las dimensiones fundamentales. Una representación de las dimensiones de una cantidad o un parámetro en términos de las dimensiones fundamentales constituye una fórmula dimensional. Si los exponentes en una fórmula son todos nulos, el parámetro en consideración es adimensional.

Los grupos adimensionales tienen especial importancia en cualquier análisis dimensional donde el objetivo principal sea buscar ciertas relaciones funcionales entre varios parámetros adimensionales. Hay diferentes razones para considerar grupos adimensionales en lugar de variables o cantidades dimensionales. Primero, las expresiones matemáticas de las leyes físicas fundamentales son dimensionalmente homogéneas (todos los términos en una expresión o ecuación tienen las mismas dimensiones) y pueden escribirse de forma adimensional simple bajo una elección apropiada de las escalas para normalizar las diferentes cantidades. Segundo, las relaciones adimensionales representadas en matemáticas o de forma gráfica son independientes del sistema de unidades usado y ellas facilitan las comparaciones entre los datos obtenidos por diferentes estudios en diferentes localizaciones e instantes de tiempo. Tercero, y quizás la razón más importante para trabajar con parámetros adimensionales, es que la no dimensionalidad siempre reduce el número de parámetros que están involucrados en una relación funcional. Esto procede del teorema de Buckingham Pi que establece que la forma más general de cualquier ecuación física completa, es decir, que subsiste sin alteración de forma al cambiar las unidades fundamentales:

$$f(x_1, \dots, x_n) = 0 \quad (1)$$

es:

$$F(\pi_1, \dots, \pi_i) = 0 \quad (2)$$

donde las  $\pi$  son los monomios independientes de dimensión nula que pueden formarse con las  $n$  magnitudes consideradas. El número de estos monomios independientes es  $i = n - q$ , donde  $q$  es el número de unidades fundamentales necesarias para medir las  $n$  magnitudes. (Palacios, 1964)

Las relaciones funcionales entre los grupos adimensionales que surgen del análisis dimensional se denominan relaciones de semejanza. A la hipótesis original, que precede al análisis dimensional, se le denomina hipótesis de semejanza y al análisis basado en el mismo se le denomina análisis o teoría de semejanza.

#### Teoría de semejanza de Monin-Obukhov

Monin y Obukhov (1954) usaron el análisis dimensional de acuerdo con el teorema de Buckingham Pi. En este análisis, las dimensiones independientes son la longitud en metros, el tiempo en segundos, y la temperatura en K. Los parámetros dependientes en la capa superficial son:

- la altura en metros,  $z$
- la velocidad de fricción,  $u_*$ , en m/s, escala de velocidad con magnitud igual al tensor de Reynolds,  $\tau_R$

$$u_*^2 = \sqrt{\overline{(u'w')_s}^2 + \overline{(v'w')_s}^2} = \frac{\tau_R}{\rho} \quad (3)$$

donde  $\overline{(u'w')_s}$  y  $\overline{(v'w')_s}$  son los flujos de cantidad de movimiento,  $\rho$  es la densidad.

- el flujo cinético de calor en (K m/s) ,

$$\frac{H}{\rho c_p} = \overline{(w'\theta')} \quad (4)$$

donde  $\overline{(w'\theta')}$  es el flujo de calor vertical.

- el parámetro de flotabilidad en  $m/s^2K$ ,

$$B = \frac{g}{\theta_0} \quad (5)$$

donde  $g$  es la gravedad y  $\theta_0$  es la temperatura potencial media.

El parámetro adimensional que caracteriza los procesos en la capa superficial es:

$$\zeta = z/L \quad (6)$$

donde

$$L = - \frac{u_*^3}{\kappa \frac{gH}{T\rho c_p}} \quad (7)$$

y  $\kappa$  es la constante de von Karman, que toma valores entre 0.35 y 0.41 (nosotros consideraremos 0.4).

La escala de longitud  $L$  se llama longitud de Obukhov. Una interpretación física de la longitud de Obukhov es que es proporcional a la altura sobre la superficie en la que la flotabilidad domina sobre la producción mecánica (cizalla) de la turbulencia. Así, los efectos de la cizalla del viento generalmente dominan a los efectos de la flotabilidad, que esencialmente permanecen despreciables en las capas más bajas ( $z \ll |L|$ ). Por otro lado, los efectos de la flotabilidad pueden dominar sobre la turbulencia generada por la cizalla para  $z \gg |L|$ . (Arya, 2001)

La predicción de semejanza que hace la teoría de M-O es que cualquier cantidad del flujo medio o de turbulencia promediada en la capa superficial, cuando se normaliza por una combinación apropiada de las escalas arriba indicadas, debe ser una función únicamente de  $z/L$ . Partiendo de esta consideración, se pueden formular diversas relaciones de semejanza para cantidades en que estemos interesados. En la capa superficial podemos definir la cizalla adimensional del viento como:

$$\phi_M = \frac{\kappa z}{u_*} \sqrt{\left(\frac{\partial \bar{U}}{\partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial \bar{V}}{\partial z}\right)^2} = 1 + 4.7 \frac{z}{L} \quad (8)$$

donde  $\bar{U}$  y  $\bar{V}$  son las velocidades medias en dirección  $x$  e  $y$  respectivamente.

Ésta es una de las funciones universales de semejanza básica que relaciona el flujo de cantidad de movimiento en la capa superficial con los gradientes medios de la velocidad.

Ahora bien, existen tres límites asintóticos que se manifiestan al analizar las expresiones de las funciones universales:

### 1) Límite estable

Para condiciones fuertemente estables, se tendría que  $\zeta \rightarrow \infty$  y los movimientos verticales apenas se desarrollan debido a la intensidad de la estratificación (el flujo de calor es negativo). Esto corresponde a noches despejadas con poco viento. El tamaño de los remolinos vendría delimitado por la estabilidad de la capa y no por la distancia a la superficie.

### 2) Límite inestable

Cuando las condiciones son fuertemente inestables ( $\zeta \rightarrow -\infty$ ), el viento suele estar en calma y los movimientos convectivos son de gran intensidad (el flujo de calor es positivo), es decir, situaciones de gran convección. En este caso, el análisis de escala de M-O no es aplicable.

### 3) Límite neutro

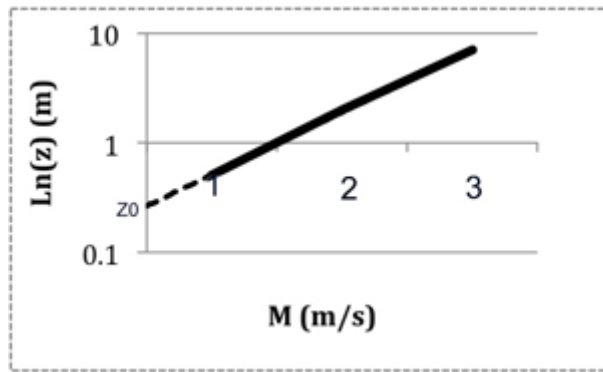
En días nublados y con mucho viento, H es muy pequeña y  $u^*$  es muy grande lo que nos lleva a un  $\zeta$  negativo y cercano a cero. Para condiciones neutras, se tiene que  $\zeta \rightarrow 0$  y se tendría  $\phi_M = 1$ . Esto nos lleva, por integración a:

$$\bar{M}(z) = \frac{u_*}{\kappa} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (9)$$

donde  $z_0$  es la longitud de rugosidad y  $\bar{M}$  es el módulo del viento horizontal. Esta ecuación constituye la expresión del perfil logarítmico del viento para la capa superficial en condiciones neutras.

## Longitud de rugosidad

La longitud de rugosidad se define como la altura donde la velocidad del viento se hace cero. Gráficamente, se calcula extrapolando la velocidad del viento en una gráfica semi-log a la altura donde la velocidad es cero. Esta altura no es la altura de los diferentes elementos rugosos en el suelo. Pero sí que existe una relación de forma que la longitud de rugosidad de una determinada superficie no depende de la velocidad del viento, ni de la estabilidad, o del esfuerzo. Puede variar al cambiar el tipo, la altura o la cobertura de vegetación. En todos los casos, la longitud de rugosidad es siempre inferior a la altura física de los elementos rugosos.



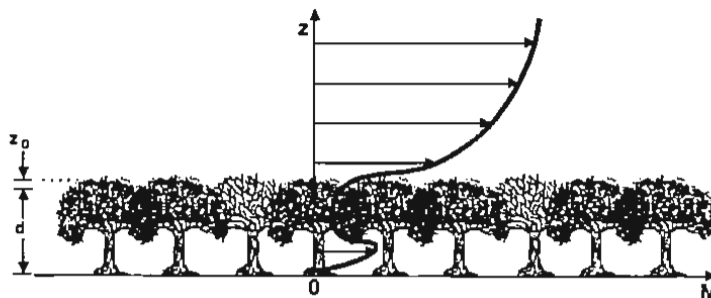
**Ilustración 1: Determinación de la altura de rugosidad  $z_0$  por extrapolación del perfil logarítmico del viento en el punto  $M(z_0) = 0$**

### Distancia de desplazamiento

En tierra, si los elementos rugosos están empaquetados muy juntos, entonces la cima de los elementos actúa como una superficie desplazada. Por encima del techo del dosel, el perfil de viento aumenta logarítmicamente con la altura. Así, se puede definir una altura de desplazamiento y una longitud de rugosidad, tal que:

$$\bar{M}(z) = \frac{u_*}{\kappa} \ln \left( \frac{z-d}{z_0} \right) \quad (10)$$

para condiciones estáticamente neutras, donde ahora definimos la altura de velocidad de viento cero en  $z = d + z_0$ .



**Ilustración 2: Flujo sobre el dosel de un bosque mostrando la velocidad del viento,  $M$ , como función de la altura,  $z$ . La gruesa capa del dosel actúa como una superficie desplazada,  $d$ , sobre la superficie real. (Stull, 1999)**

### Coeficiente de arrastre

Lettau (1959) introdujo el concepto de coeficiente de arrastre aplicado a la atmósfera, basándose en el análisis de semejanza a partir de datos experimentales. La esencia de este método consiste en expresar los flujos verticales turbulentos de cantidad de movimiento, etc. en función de unos coeficientes de transferencia adimensionales, de manera que



$$-\overline{u'w'} = u_*^2 = C_D \bar{U}^2 \quad (11)$$

donde los tres factores deben corresponder a la misma altura sobre la superficie (Castro, González, & Portela, 1991). En condiciones neutras, se suele asumir que

$$C_{HN} = C_{EN} = C_{DN} \quad (12)$$

siendo, respectivamente, coeficientes de transferencia para el calor, la humedad y la cantidad de movimiento en condiciones neutras. Sobre la tierra el arrastre puede deberse al arrastre de fricción, al de forma o al de onda. El arrastre de fricción está relacionado con la difusión molecular de la cantidad de movimiento. El arrastre de forma está relacionado con la diferencia de presión formada por la desaceleración del aire al chocar con una montaña o edificio. El arrastre de onda está relacionado con el transporte de cantidad de movimiento por ondas de gravedad (flotabilidad) en aire estáticamente estable, por ejemplo las ondas de montaña.

El coeficiente de arrastre depende de la rugosidad de la superficie, de la altura de medición y de la estabilidad. (Stull, 1999)

### Estabilidad atmosférica

Cuando hablamos de estabilidad atmosférica, nos referimos a una condición de equilibrio. De forma que, en una atmósfera estable se produce una perturbación en el flujo. Si tras la perturbación vuelve al estado original el sistema es estable. Pero si la perturbación evoluciona y cambia el estado del sistema entonces se dice que es inestable.

Distinguimos dos tipos de estabilidad:

- Estabilidad estática
- Estabilidad dinámica

## Estabilidad estática

La estabilidad estática mide la resistencia gravitacional de la atmósfera a los desplazamientos verticales. Esto resulta fundamentalmente de ajustes de flotabilidad, y por tanto está determinado por la estratificación de la densidad o de la temperatura potencial,  $\theta$ ,<sup>2</sup>. Las diferencias de densidad dan lugar a fuerzas de empuje hacia arriba o hacia abajo. Podemos diferenciar tres casos:

- Estable. Cuando el gradiente de la temperatura potencial es positivo, la densidad de la parcela de aire desplazada hacia arriba (abajo) es mayor (menor) que la del aire circundante, y se hundirá (ascenderá) a su posición inicial.
- Inestable. Cuando la variación de la temperatura potencial con la altura es negativa, la densidad de la parcela de aire ascendente es inferior a la del aire circundante y, por tanto, ésta continúa ascendiendo debido al empuje. Estos movimientos convectivos aumentan la turbulencia y la mezcla.
- Neutro. Si no hay variación de temperatura potencial con la altura, la densidad de la parcela de aire es la misma que la del aire circundante y no experimenta ninguna fuerza de empuje. (Bache & Johnstone, 1992)

## Estabilidad dinámica

La estabilidad dinámica depende en parte del viento. Por definición, un flujo estáticamente inestable es siempre dinámicamente inestable, puesto que la convección contribuye a la generación de turbulencia. En un ambiente estáticamente estable, los movimientos verticales turbulentos actúan en contra de la gravedad. Así, la flotabilidad tiende a suprimir la turbulencia, mientras que la cizalla tiende a generar turbulencia mecánicamente. Cuando la cizalla es mayor que la flotabilidad, la estabilidad estática no es suficientemente fuerte para evitar la generación mecánica de la turbulencia y decimos que se trata de un fluido dinámicamente inestable. El flujo es dinámicamente estable (laminar) cuando el consumo de energía por parte de la flotabilidad es mayor que la producción

---

<sup>2</sup> Es la temperatura efectiva cuando se elimina la variación de la temperatura debida a los cambios de presión con la altura.

mecánica de energía turbulenta (Stull, 1999). Recordando la interpretación física de la longitud de Obukhov, ésta, o  $z/L$ , se puede utilizar como un parámetro de estabilidad considerándolo como un parámetro que cuantifica la importancia relativa de la flotabilidad sobre la cizalla en los procesos de estratificación atmosférica.

Condiciones atmosféricas estables:  $z/L > 0.01$

Condiciones atmosféricas neutras:  $0.01 > z/L > -0.01$

Condiciones atmosféricas inestables:  $-0.01 > z/L > -0.1$

Condiciones atmosféricas muy inestables:  $-0.1 > z/L$

## Experimentación

### Datos

Tanto los datos obtenidos como la información adicional de los ecosistemas y las estaciones fueron extraídos de la base de datos, de los archivos metadata de la red CARBORED-ES, Red de Observación Sistemática de Flujos de Carbono y Energía en Ecosistemas Terrestres en España, a las que se tiene acceso gracias a que las estaciones pertenecen a ella. Cuando era necesario se ha solicitado información al responsable de la estación.

### Descripción de los ecosistemas

Al ser éste un estudio del viento la descripción de los ecosistemas se centrará en las características aerodinámicas de éstos. Señalando las peculiaridades de cada caso que modifique el aspecto de la superficie a estudiar y pueda afectar al flujo de aire.

#### *Llano de los Juanes, Sierra de Gádor (Matorral)*

Llano de los Juanes (36°55'41.7"N; 2°45'1.7"W) se encuentra en la Sierra de Gádor, un macizo montañoso localizado en el extremo sur oriental de la península ibérica en la provincia de Almería. Suele nevar de diciembre a marzo y el régimen de vientos está dominado por los vientos de norte noreste durante el día (45% del viento del día) y del sur durante la noche (52%). Es una meseta cubierta de matorral de alta montaña localizada a 1600 metros de altitud sobre el nivel del mar. El matorral esta formado por una comunidad vegetal denominada lastonar representado por dos especies vegetales dominantes *Festuca scariosa* (19%) (cuyo limbo mide unos 70 cm y cuando florece le crecen unas espigas de hasta 1.2 m) y *Genista pumila ssp. Pumila* (15%), la cual mide entre 5 y 70 cm. Acompañan *Hormatophylla spinosa* (L.) P. K pfer, de unos 30 cm (6.30 %), *Thymus serpylloides* Bory de unos 20 cm (5%), *Phlomis lychnitis* L., entre 20 y 50 cm de altura (3.3%) y otras como *Lav ndula lanata* Boiss, *Salvia lavandulifolia* Vahl., y *Eryngium campestre* L. Esporádicamente y localizados en posiciones muy particulares aparecen elementos propios de la comunidad serial como *Quercus rotundifolia*, *Crataegus monogyna*, *Juniperus oxycedrus* y *Asparagus acutifolius*. Cubren en total una media de 46,7% del suelo. El matorral suele florecer entre finales de marzo,

principios de abril y junio o julio. De esta forma el LAI del matorral varía según la fenología de sus componentes de 1,31 a 2,71 m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>.

#### *Laguna Seca, Sierra Nevada (Piornal)*

La Laguna Seca es una cuenca endorreica (2300 m a.s.l.) situada en la vertiente septentrional del macizo montañoso de Sierra Nevada (37°05'N 2°57'W), y más concretamente entre las elevaciones del Chullo (2610 m a.s.l.) y Almirez (2512 m a.s.l.), a 39 km de la costa mediterránea. Debido a su altitud y localización suele estar cubierto de nieve de diciembre a marzo. Las aguas del deshielo se acumulan en el fondo creando una laguna que se mantiene aproximadamente un mes. La torre está de hecho situada sobre una zona de homogeneidad que no se rompe hasta los 100 m (rocas de la zona norte) o 200m (localización de la laguna, SW) de donde viene el viento dominante.

En este piornal predominan las especies *Festuca indigesta* y *Cytisus purgans*, alcanzando una altura de 20 cm y cubriendo homogéneamente el 45% del suelo. El 35% restante corresponde al lecho quedando un 20% del suelo desnudo. La presencia de otras especies es intermitente durante el año y muy escasa. El LAI es prácticamente constante durante todo el año de 1,23 m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>. ( Reverter, Sánchez-Cañete, Resco, Serrano-Ortiz, Oyonarte, & Kowalski, 2010)

#### *Loma de Lanjarón, Sierra Nevada (Bosque quemado)*

La estación se encuentra en la loma de Lanjarón, Sierra Nevada, (36°58'3.45"N, 3°28'37,47"W) a una altitud de 2317 m a.s.l orientada al suroeste (220,89) y con una pendiente de 14,7%. El viento dominante es del suroeste debido a su orientación. Nieva durante el invierno, normalmente entre noviembre y marzo. Este área fue afectada por un incendio ocurrido en Septiembre de 2005. Dicho incendio afectó aprox. 1500 ha de bosques de pinos (*Pinus sylvestris*) de reforestaciones realizadas hace 40 años. El estudio comienza el marzo 2008, en el que había 1060 ± 50 árboles/ha con una altura media de 6,36 ± 0,06 m y una d.b.h. (diameter at breast height) de 13.34 ± 0.17 cm. Ningún árbol sobrevivió al incendio, en marzo del 2008 el 88,67% (unos 940 árboles/ha) de los árboles quemados se mantenía en pie. Han ido cayendo progresivamente a lo largo de los años (en marzo del 2009 aún quedaban en pie el 77,56% de los árboles). En marzo de 2010, cuando termina el estudio, sólo quedan en pie el 2,56% (unos 27

árboles/ha) que se han dejado en el suelo. Las especies perenes más comunes son *Genista versicolor* (de 30 a 70 cm de altura), *Festuca spp.* (de unos 20 cm de altura), and *Sesamoides prostrata*, cuyos tallos miden de 10 a 20 cm. (Marañón-Jiménez, et al., 2011).

#### *Las Majadas de Tiétar, Cáceres (Dehesa)*

Las Majadas de Tiétar (39° 56'58.4" N, 5°47'17.2" W) se encuentra a una altitud de 258 m a.s.l. y una pendiente inferior a 5%. El viento dominante proviene del suroeste y del nordeste. Es una dehesa cuyo estrato abierto de árboles (24,8 ha<sup>-1</sup>) está compuesto por encinas (*Quercus ilex ssp ballota Lam.*) con la presencia esporádica de *Q. suber L.* o *Q. faginea Lam.* (< 5%). La fracción del dosel es del 20% cuya altura media es de 8 m y el d.b.h. medio es de 45 cm. El estrato herbáceo está compuesto principalmente por especies: *Vulpia bromoides (L.) SF Grey*; *V. geniculata (L.) Link*; *Trifolium sub-terraneum L.*, *Ornithopus compressus L.*. Las plantas herbáceas envejecen para finales de mayo. Durante todo el año es pasto para reces y en verano se produce la transhumancia del 50% del ganado de las montañas cercanas. El LAI medio de las Majadas es de 2,5 m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>. (Casals, Gimeno, Carrara, Lopz-Sangil, & Sanz, 2009)

#### *Sueca, Valencia (Arrozal)*

Se sitúa a 0° 18' 54.8" W de longitud y 39° 16' 31.9" N de latitud, a una altitud de aproximadamente 10 m a.s.l. La torre está ubicada dentro de los límites del Parque Natural de la Albufera de Valencia, en la zona de marjal dedicada al cultivo del arroz (*Oryza sativa*). Prevalecen los vientos del este y oeste de forma que el fetch es de 2 km.

Se trata por lo tanto de un ecosistema agrícola con un monocultivo. Los campos permanecen secos de enero a abril realizándose las tareas de arado, en el mes de mayo se inundan para proceder a la siembra. La altura del arroz varía desde 0 cm, al ser sembrado, hasta unos 70 cm, variando el LAI desde 0 hasta 5 m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>. A mediados de agosto vuelven a secarse para proceder a la recolección a mediados de septiembre, y se vuelven a inundar en noviembre.

#### *El Saler, Valencia (Bosque)*

La torre (39° 20' 41.17" N; 0° 19' 12.03" W) esta ubicada sobre una barrera arenosa de unos 700 m de anchura. Al este lo limita un lago y al oeste el mar con una playa de unos 100 m de ancho. Por lo tanto el fetch<sup>3</sup> es de 300 m al este y 500 m al oeste. El emplazamiento es prácticamente llano con una altitud de 2,8 m a.s.l., mientras que la zona de estudio tiene una elevacion entre 0 y 5 m a.s.l., con un terreno ligeramente ondulado debido a la existencia de dunas. Alrededor de la torre se encuentran ejemplares de pino carrasco (*Pinus halepensis*) de aproximadamente 11 m de altura. Hay 70 árboles/ha con un d.b.h. medio de 31,8 cm. Las principales especies de la maquia son *Quercus coccifera*, *Rhamnus alaternus*, *R. lycioides*, *Pistacia lentiscus*, *Smilax aspera*, *Ruscus aculeatus*, *Phyllirea angustifolia*, *Myrtus communis*, *Erica multiflora*, *Osirys quadripartita*, *Chamaerops humilis*, *Cistus albidus* y *Cistus salviifolius*, las cuales tienen una altura media de 1,5 m. El LAI del conjunto es de 2,63 m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>.

#### *Vall d'Alinya, Prat Major, Lleida (Pastizal)*

El emplazamiento estudiado se sitúa en el valle de Alinyà (42°12'N, 1°27'E), con una pendiente inferior al 2%, en los Pirineos orientales a 1770 m a.s.l. Al ser un valle su fetch es de 150 m. El viento del norte domina sobre las demás direcciones. Se trata de un pastizal dominado por especies herbáceas: *Festuca ovina* (55%), *Festuca rubra ssp commutata* (15%), *Potentilla pneumoniana* (7,5%), *Phleum pratense* (5,5%), *Thymus serpyllum* (4,5%). En el valle el ganado pasta desde mediados de junio a mediados de octubre por lo que la altura de la vegetación varía a lo largo del año de 0,05 a 0,1 m. Tiene un LAI máximo de 2,47 m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>.

#### *Balsa Blanca y Amoladeras, Cabo de Gata (matorral)*

Las estaciones están situadas en el Parque Natural de Cabo de Gata, en la provincia de Almería al SE de España (36°56'26.0"N, 2°01'58.8"W). Los dos emplazamientos están ubicados a unos 15 km de distancia. Se encuentran en un llano. Balsa blanca (sitio no degradado) es una pradera natural a 200 m a.s.l.; mientras que Amoladeras (sitio degradado), está más cerca del mar, a 50 m a.s.l., con menos vegetación. Ambas estaciones tienen pendientes entre los 2% y 6%, estando Balsa blanca orientada al noroeste y Amoladeras hacia el suroeste. La

---

<sup>3</sup> distancia hasta que se rompe la homogeneidad

vegetación de estos sitios esta dominada por *S. tenacissima* (con altura media entre 60 y 100 cm), pero hay un gran número de otras especies herbáceas más cortas en baja densidad, tales como: *Chamaerops humilis*, *Rhamnus lycioides*, *Asparagus horridus*, *Olea europea var. sylvestris*, *Pistacia lentiscus*, y *Rubia peregrina*. El ecosistema se caracteriza por áreas abiertas libres de vegetación, con una cobertura vegetal de 23% en Amoladeras y 63% en Balsablanca. (Rey, Pegoraro, Oyonarte, Were, Escribano, & Raimundo, 2010)

Sitio	Long	Latitud	Altitud m	Relieve	Orient.	Veg.	Altura veg (cm)	Cobert.	Datos años
GAD	2°45'1.7"W	36°55'41.7"N	1600	macizo	-	matas	70 120	46,7%	5.04- 12.07
LAS	2°57'W	37°05'N	2300	cuenca	-	piornos	20	45%	2007- 2008
LAJ	3°58'3.45"W	36°58'3.45"N	2317	loma	SW	bosque	636	940 27ha <sup>-1</sup>	3.08 3.10
MAJ	5°46'24.1"W	39°56'29.4"N	258	llanura	-	dehesa	800 200	24,8 ha <sup>-1</sup>	2007- 2008
SUE	0°18'58.8"W	39°16'31.9"N	10	llanura	-	arrozal	70	100%	2007- 2008
SAL	0°19'7.7"W	39°20'45.5"N	5	dunas	-	bosque	1100 150	70ha <sup>-1</sup>	2007- 2008
VDA	1°26'54'E	42°09'7.84"N	1770	valle	-	pastos	10	87,5%	2007- 2008
BB	2°01'58"W	36°56'26"N	208	llanura	NW	matas	60 100	63%	2007- 2008
AMO	2°15'58"W	36°50'26"N	65	llanura	SW	matas	60 100	23%	2007- 2008

Tabla 1: Tabla resumen de algunas características de las distintas estaciones incluyendo: longitud, latitud, altitud, relieve, orientación, comunidad vegetal, altura media de la vegetación, cobertura o densidad de población, años estudiados en este trabajo



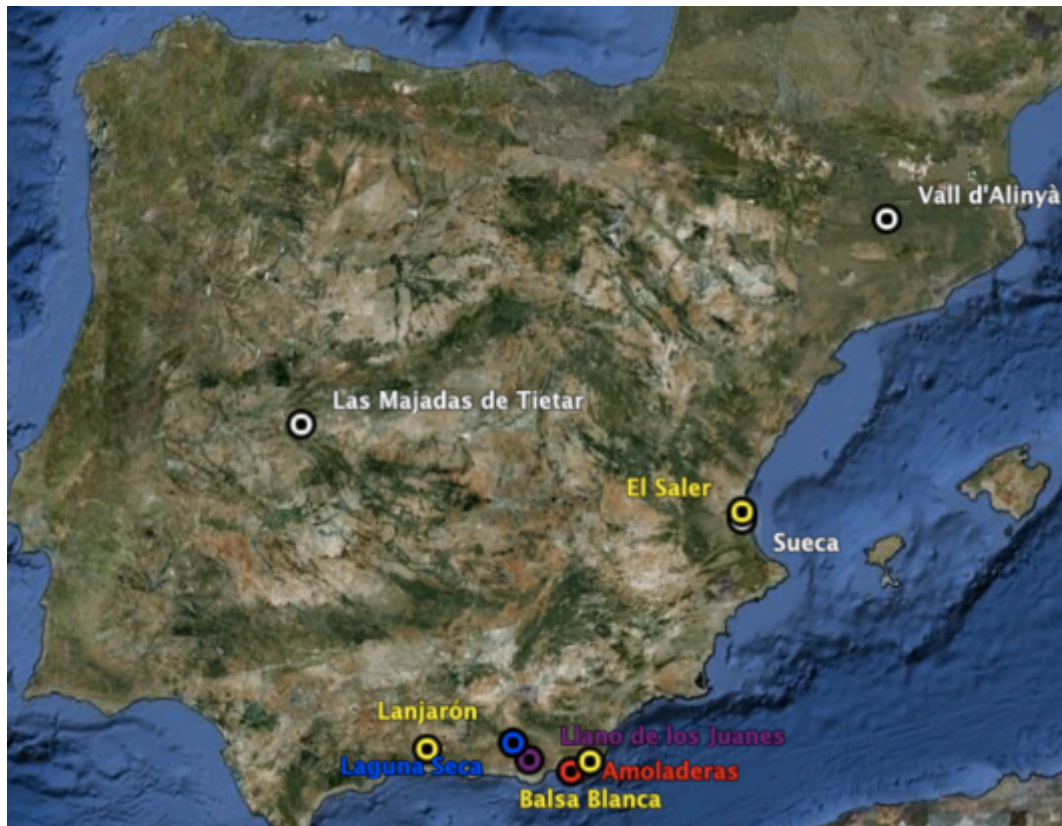


Ilustración 3: Mapa de todas las estaciones

### Descripción de las estaciones

Todas las estaciones estudiadas constan de torres meteorológicas y torres de flujo (Eddy covariance) con diversos instrumentos. Puesto que este estudio se centra en el viento sólo describiremos los anemómetros. El anemómetro sónico se basa en que la velocidad de propagación del sonido depende de la velocidad del viento. Lo que se mide en este caso es el tiempo que demora una señal de sonido en atravesar una distancia conocida (normalmente unos 20 cm). Este intervalo es tiempo está relacionado con la velocidad del viento en la dirección entre el emisor y el receptor. Mediante una medición similar, realizada en una dirección perpendicular a la anterior, se puede calcular la velocidad total del viento y su dirección. Mide las tres componentes ortogonales ( $u_x$ ,  $u_y$ ,  $u_z$ ) del viento y la temperatura a una frecuencia determinada.

Puesto que para estudiar la estabilidad hemos calculado la longitud de Obukhov, la cual depende de la temperatura del aire ( $T_a$ ) comentaremos el termohigrómetro utilizado en cada estación. Éste es un instrumento que consta de

dos sensores: una resistencia de platino (que cambia su resistencia con la temperatura) para la medición de la temperatura del aire y un sensor eléctrico (generalmente un condensador que modifica sus propiedades eléctricas generando una señal eléctrica proporcional a la humedad) para la humedad relativa.

También se comenta el instrumento utilizado para medir ya sea la radiación directa y reflejada o la cantidad de radiación fotosintéticamente activa (400-700 nm) (PPFD, incidente y reflejada) necesario para determinar el albedo y detectar la presencia de nieve.

MEDIDAS	INSTRUMENTACIÓN	F (Hz)	H(m)
<b>Llano de los Juanes, GAD</b>			
<b>Viento</b>	CSAT-3, CSI, USA	10	2,7
<b>T<sub>a</sub></b>	HMP 35-C, CSI, USA	0,1	1,5
<b>PPFD</b>	Li-190, (Li-Cor 7500, Lincoln, USA)	0,1	1,5
<b>Laguna Seca, LAS</b>			
<b>Viento</b>	USA-1; Metek, Elmshorn, GER	1	2,5
<b>T<sub>a</sub></b>	HMP 45; CSI, Logan, Utah, USA	1	1,5
<b>PPFD</b>	Li-190SZ; Li- Cor, Lincoln, NE, USA	1	1,5
<b>Lanjarón, LAJ</b>			
<b>Viento</b>	Model 81000, R.181 M. Young, Traverse City, MI, USA	10	10
<b>T<sub>a</sub></b>	HMP 35C, CSI, USA	10	1,5
<b>PPFD</b>	Li-190, Li-Cor, Lincoln, NE, USA	10	1,5
<b>Las Majadas, MAJ</b>			
<b>Viento</b>	SOLENT R3-50 (Gill Instruments, Lymington, UK)	10	15,9,5;15.6*
<b>T<sub>a</sub></b>	Thies Clima, Goettingen, GER		
<b>R</b>	LI-200SA (LI-COR Inc., Lincoln, NE, USA) + CM-3 (Kipp & Zonen B. V., Delft, The Netherlands)	0,1	15
<b>Sueca, SUE</b>			
<b>Viento</b>	SOLENT R3-50 (Gill Instruments, Lymington, UK)	10	2,5
<b>T<sub>a</sub></b>	Thies Clima, Goettingen, GER	0,1	2
<b>El Saler, SAL</b>			
<b>Viento</b>	SOLENT R2 (Gill Instruments, Lymington, UK)	10	15,5
<b>T<sub>a</sub></b>	Thies Clima, Goettingen, GER	0,1	12
<b>Vall d'Alinyà, VDA</b>			
<b>Viento</b>	SOLENT R2 (Gill Instruments, Lymington, UK)	10	2,25
<b>T<sub>a</sub></b>	Thies Clima, Goettingen, GER	0,1	2,5
<b>R</b>	CM-3 (Kipp & Zonen B. V., Delft, The Netherlands)	0,1	2,5
<b>Balsablanca, BB</b>			
<b>Viento</b>	CSAT-3, Campbell Scientific, Logan, UT, USA	10	3,25
<b>T<sub>a</sub></b>	HMP 35C, CSI, USA	10	2
<b>Amoladeras, AMO</b>			
<b>Viento</b>	CSAT-3, Campbell Scientific, Logan, UT, USA	10	3
<b>T<sub>a</sub></b>	HMP 35C, CSI, USA	10	2

Tabla 2: Lista de las variables medidas en las distintas estaciones incluyendo los instrumentos, la frecuencias de medida y la altura. \*Para el perfil de viento se toman medidas a 5, 9, 15 m y para la velocidad de fricción es a 15,6 m.

## Método

El coeficiente de arrastre depende de la estabilidad. En este estudio sólo calculamos el coeficiente de arrastre para estratificación estáticamente neutra. Por ello lo primero que hacemos es filtrar los datos, considerando neutros los datos tales que  $0.01 > z/L > -0.01$ . Para ello se calculó  $L$  a partir de la ecuación (7).

Tras filtrar los datos según la estabilidad, se filtra según la dirección del viento. Esto sólo se hace si resulta necesario, es decir, si la distribución de la vegetación no es homogénea, si la estación está orientada a una dirección determinada o existe un obstáculo topográfico. Esto se hizo teniendo en cuenta la información de la descripción de las estaciones y calculando la dirección dominante del viento en el periodo de estudio.

Una vez seleccionados los datos neutros y en la dirección del viento dominante se agruparon según la fenología del ecosistema en el que se encontraba cada estación. En primer lugar se consultó a los responsables de cada estación, en caso de las estaciones andaluzas, y a los archivos descriptivos de cada estación de la red Carbored, en el caso de las demás estaciones. También se consultaron documentos fotográficos para averiguar el aspecto de los ecosistemas en cada uno de los casos fenológicos y se calculaba el albedo (para identificar los episodios de nevadas). La agrupación ha sido un tanto arbitraria puesto que se carece de datos de la fecha exacta en que brotaron o florecieron las plantas en cada ecosistema en el periodo de estudio pero se comprobó que ésta no era significativa. Se añadían puntos paulatinamente a la representación gráfica de datos (velocidad del viento vs velocidad de fricción) cuando se observaba el crecimiento de una segunda rama se dividía la selección en dos grupos, considerando que la segunda rama correspondía a una nueva fenología (comprobándolo en las fotografías disponibles).

Representando gráficamente la velocidad de fricción frente a la velocidad del viento, obtenemos  $z_0$ , a partir de la ecuación del perfil de viento (10), realizando una regresión lineal ( $y=ax+b$ ). De esta forma se tiene,

$$x = M; y = u^*; a = \frac{\kappa}{\ln \frac{z}{z_0}} \rightarrow Z_0 = \frac{z}{e^{\frac{\kappa}{a}}}$$

Para el caso de  $C_{DN}$  se representa gráficamente el cuadrado de la velocidad del viento frente al cuadrado de la velocidad de fricción y realizando una regresión lineal identificamos la pendiente de la recta de regresión como el coeficiente de arrastre neutro.

$$x = M^2; y = u^{*2}; a = C_{DN}$$

Obtenidos los resultados para cada situación considerada se procedió a comprobar mediante una prueba de hipótesis si éstos eran estadísticamente diferentes. Se desarrolla entonces una prueba de hipótesis (15), a partir de la cual se comparan estadísticamente las pendientes entre los modelos de regresión lineal simple ajustados, prueba denominada “de paralelismo” (Zar 1984). Para esto, se emplea una prueba de F convencional con un F calculado ( $F_c$ ) particular (16), contra un F tabular ( $F_t$ ) (17).

$$\text{Hipótesis nula} \rightarrow H_0: \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_k \quad (15)$$

$$\text{Hipótesis alterna} \rightarrow H_a \rightarrow \beta_i \neq \beta_j$$

Donde:

$\beta_i$  representa la pendiente del modelo de regresión lineal ajustado para cada cobertura con  $i: 1, 2, \dots, k$  (para  $C_{DN}$  y  $Z_0$ ).

$$F_c = \frac{\left( \frac{S_c - S_p}{k-1} \right)}{\frac{S_c}{L_p}} \quad (16)$$

donde:

$S_c$  = Suma de cuadrados residual común.

$S_p$  = Suma de cuadrados residual agrupado (sumatoria de las sumas de cuadrados residuales para cada regresión)

$L_p$  = Grados de libertad residual agrupado.

$k$  = Número de modelos de regresión (o número de coberturas vegetales evaluadas).

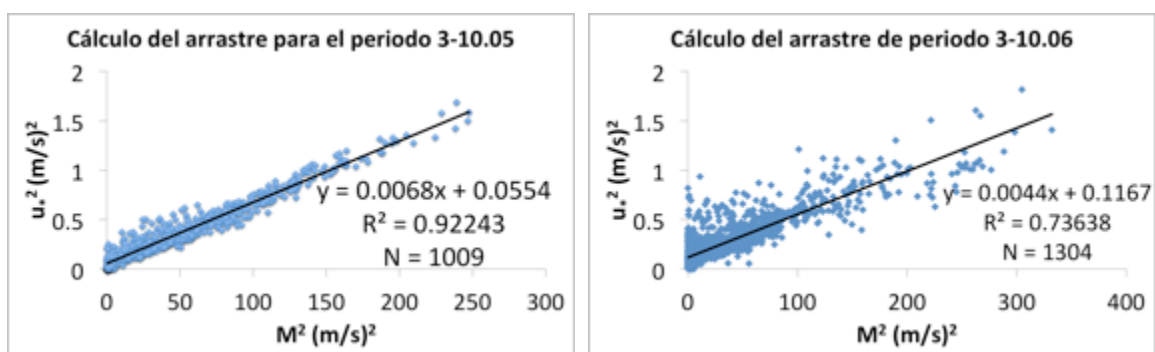
$$F_{ta(1)v1,v2;a} = 0.01 \quad (17)$$

Con  $v_1$  y  $v_2$  grados de libertad del numerador y denominador respectivamente.  
(Patiño, León Peláez, Montes, & Hernández, 2007)

## Resultados

### Estudio de caso: Gádor

En los Llanos de los Juanes (GAD) suele nevar entre noviembre y marzo y florece después de las nieves, es decir, a finales de marzo o en abril. Al examinar las fotografías (consultar fotografías de Gádor en Apéndice III) se comprueba esta fenología, con excepción de algunos años secos en los que apenas florecen las gramíneas y años en los que brotan más plantas. Teniendo en cuenta esto se dividen los datos en los diferentes grupos, manteniendo la cronología y se obtienen los resultados resumidos en la siguiente tabla.

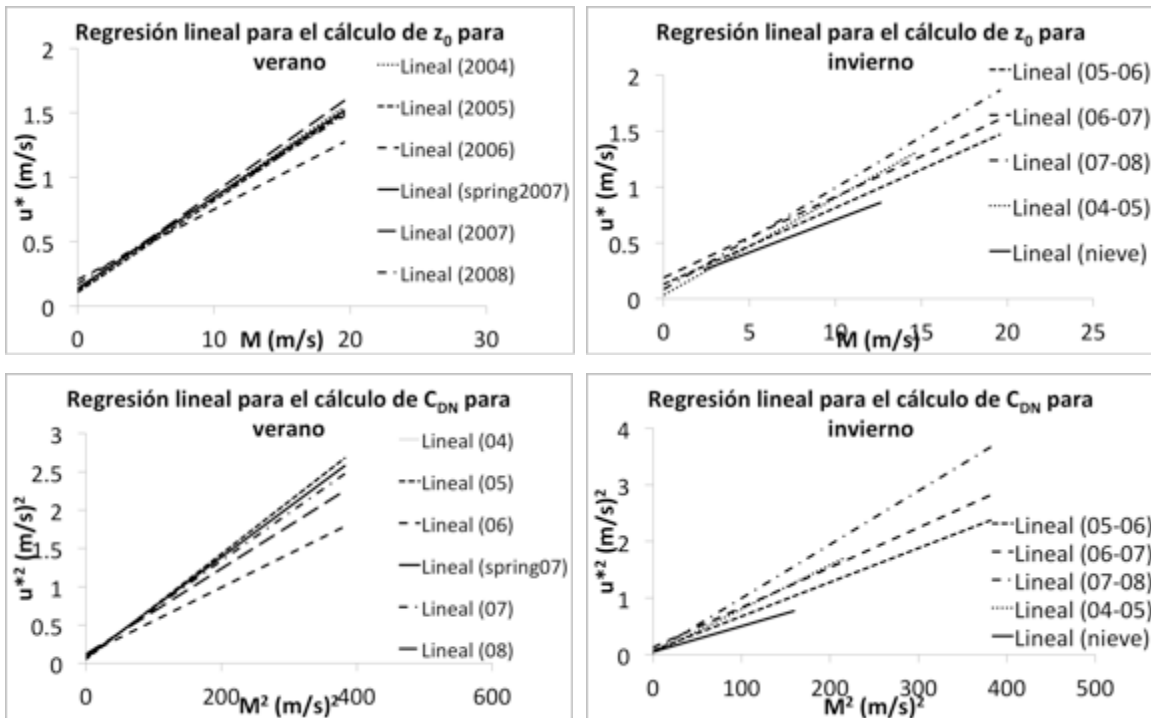


Gráfica 1: Representación gráfica del cuadrado de la velocidad de fricción frente al cuadrado de la velocidad promedio del viento. Mediante regresiones lineales se calcula  $C_{DN}$ , la cual es la pendiente de la resta de regresión. Para los periodos estivales 2005 y 2006 en el matorral del Llano de los Juanes. N es el número de datos representados.

Periodo	Escenario	Longitud de rugosidad			Coeficiente de arrastre n.	
		$z_0$ (m)	a	$R^2$	$C_{DN}$	$R^2$
06.04 - 10.04	(a)	0.0113	0,07306	0.8721	0.0071	0.909
10.04 - 03.05	(a)	0.0283	0.0877	0.6747	0,0077	0.6327
03.05 - 10.05	(a)	0.0097	0,07108	0.8933	0.0068	0.9243
10.05 - 03.06	(a)	0.0078	0.06851	0.7368	0.0060	0.7756
03.06 - 10.06	(b)	0.0018	0.05463	0.7315	0.0044	0.7364
11.06 - 03.07	(a)	0.0109	0.0725	0.7316	0,0073	0.7574
03.07 - 05.07	(c)	0.0093	0.0706	0.7600	0.0065	0.7891
06.07 - 10.07	(c)	0.0131	0.0750	0.9396	0,0062	0.9291
11.07 - 03.08	(d)	0.0313	0.0898	0.8524	0,0095	0.8607
03.08 - 11.08	(b)	0.0067	0.0667	0.8521	0,0056	0,841
7 - 15.02.05*	(e)	0.0028	0.0585	0.9123	0.0045	0.9015

Tabla 3: Resumen de los  $z_0$  y  $C_{DN}$  para los diferentes periodos considerados. \*Este período corresponde a una semana en la que nevó mucho. (a) Campo con matas, (b) Campo de matas con flores y hierbas, (c) Campo de matas con espigas, (d) Campo matas con espigas secas, (e) Campo de matas nevado.

Para los demás periodos se procedió de la misma manera llegando a los resultados de la gráfica 2 en las que se han borrado los puntos de los datos para una mayor claridad de la gráfica.



Gráfica 2: En las gráficas se representa la velocidad de fricción frente a la velocidad promedio del viento. La pendiente de las rectas de regresión está relacionada con  $z_0$ , siendo  $a = \kappa / \ln(z / z_0)$ . En las dos inferiores se representa el cuadrado de la velocidad de fricción frente al cuadrado de la velocidad promedio del viento, la pendiente de las rectas de regresión son  $C_{DN}$ . Para diferentes periodos desde 2004 y 2008 en el matorral del Llano de los Juanes. A la izquierda se tiene el caso del verano y a la derecha el invierno, donde 2004 y 2005 son campos de mata, el 2006 y 2008 son un campo de matas con flores e hierbas y el 2007 es un campo de matas con espigas

El  $C_{DN}$  medio es 0.0063 y la  $z_0$  media es de 0.0085 m. En 2004 florecieron pocas gramíneas y habían pocas espigas que se mantuvieron en pie hasta que la nieve las aplastó. Esto originó una superficie más rugosa de lo normal, puesto que la superficie es varias matas de 50 cm con espigas muy flexibles de algo menos de 1 m saltadas entre las matas. Las espigas ligeramente dobladas por efecto del viento y de la nieve da lugar a una superficie de suelo desnudo con matas y algunas espigas dobladas, siendo una superficie más rugosa que en verano. En la primavera del 2005 no florecieron las gramíneas pero crecieron algunas flores y hierbas dando lugar a una superficie menos rugosa. En invierno el suelo está parcialmente cubierto por las matas y hierba seca del mismo tamaño que las matas resultando en una superficie más uniforme. Durante la primavera del 2006 florecieron muchas flores y creció mucha hierba dando lugar a una superficie muy lisa, tanto como si hubiera un manto de nieve. Al secarse las flores dejaron desnudo el suelo con tan sólo las matas y aumenta la rugosidad. En el 2007 florecen de forma extraordinaria las gramíneas llenando toda la llanura de espigas, esto alisa

notablemente la superficie. Pero no tanto como el efecto de las flores debido a que las espigas son de más de 1 m y flexibles. En invierno parte de la espiga cae, pero no toda ella, formando un entramado de paja. Esto hace aumentar mucho la rugosidad. En 2008 brotan muchas flores y hierbas alisando la superficie. Se puede ver fotos del ecosistema en los distintos periodos en el apéndice.

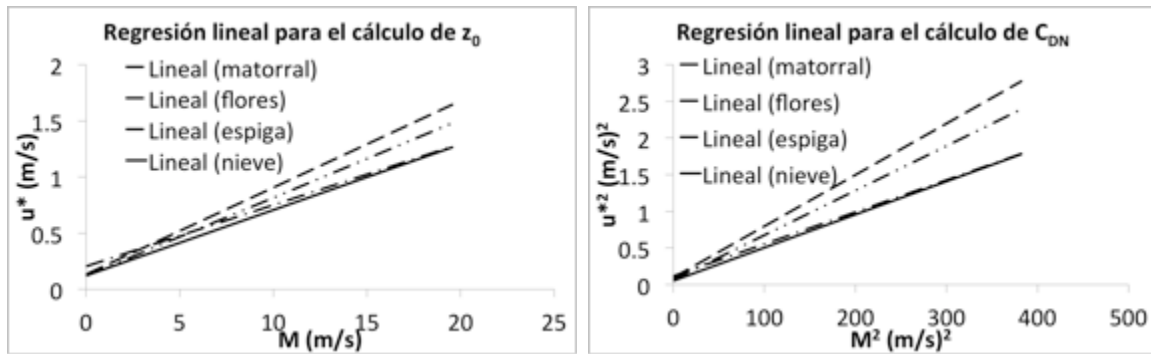
Realizamos la prueba F de forma que consideramos un nivel de confianza del 0,05 (valor  $p$ ), es decir, cuando  $p < 0,05$  consideramos las pendientes de las regresiones lineales calculadas diferentes al nivel de confianza del 95%. Tras aplicar la prueba F de forma reiterada se agrupan los diferentes períodos en cuatro escenarios diferentes, que se han llamado matas (a), flores (b), espigas (c) y nieve (d). El escenario de matas es el básico, consiste de un campo de matas con el suelo desnudo. El escenario de flores es el caso cuando el suelo se cubre de flores, brotes, hierbas todas más bajas que las matas. El escenario de espigas se refiere a los momentos en que crecen espigas más altas que las matas. Y el episodio de nieve, sólo se ha estudiado un episodio porque no se disponía de medidas cuando nevaba (las placas solares suelen quedar cubiertas de nieve y la estación deja de funcionar).

Al agrupar todas las medidas se tienen suficientes datos para filtrar los datos según la dirección dominante, como se ha hecho en las demás estaciones, salvo para los episodios de nieve. Esto produce un cambio en los resultados de las espigas, ahora parecen más rugosas que las matas.

Fenología	Escenario	Longitud de rugosidad			Coeficiente de arrastre n.	
		$z_0$ (m)	a	$R^2$	$C_{DN}$	$R^2$
Matas	(a)	0.0085	0,0696	0.8177	0.0061	0.8396
Flores	(b)	0.0013	0.0543	0.7361	0,0044	0.7364
Espigas	(c)	0.0153	0,0773	0.9191	0.0070	0.8060
Nieve*	(b)	0.0023	0.0585	0.8688	0.0045	0.9007

**Tabla 4: Resumen de los  $z_0$  y  $C_{DN}$  para los diferentes fenologías considerados. \*Este período corresponde a una semana en la que nevó mucho. (a) Campo con matas, (b) Campo de matas con flores y hierbas o nieve que cubren el suelo antes desnudo, (c) Campo de espigas**





Gráfica 3: Representación gráfica de la velocidad de fricción frente a la velocidad promedio del viento (izquierda) y del cuadrado de la velocidad de fricción frente al cuadrado de la velocidad promedio del viento (derecha), las regresiones lineales realizadas para el cálculo de  $z_0$  y  $C_{DN}$  para diferentes fenologías del matorral en el Llano de los Juanes entre junio 2004 y diciembre 2008. Siendo “matorral” un campo de matas, “flores” un campo de matas con hierbas y flores, “espiga” un campo de matas con espigas y “nieve” un campo de matas nevado.

### Resumen de todos los sitios

Para los demás ecosistemas procedemos de forma semejante que para el caso de Los Llanos de los Juanes, eso sí, teniendo en cuenta las fenologías particulares de cada sitio.

Fenología	Escenario	Longitud de rugosidad			Coeficiente de arrastre n.	
		$z_0$ (m)	a	R <sup>2</sup>	C <sub>DN</sub>	R <sup>2</sup>
GAD: Matas	(a)	0.0086	0,0696	0.8177	0.0061	0.8396
GAD: Flores	(b)	0.0018	0.0546	0.7361	0,0043	0.7364
GAD: Espigas	(c)	0.0153	0,0773	0.9191	0.0070	0.8060
GAD: Nieve*	(b)	0.0028	0.0585	0.8688	0.0045	0.9007
LAS	(c)	0.0190	0.0819	0.7452	0.0100	0.8916
LAS: Nieve*	(c)	0.0209	0.0835	0.7468	0.0101	0.7967
LAJ: 2008	(d)	0.2208	0.1049	0.8275	0.0117	0.7667
LAJ: Nieve*	(b)	0.0087	0.0567	0.5783	0.0060	0.6093
LAJ: 2010	(c)	0.0794	0.0827	0.7822	0.0080	0.8368
MAJ	(d)	0.3990	0.1093	0.7433	0.0118	0.8153
SUE: Seca	(b)	0.0023	0.0570	0.8746	0.0032	0.8660
SUE: Inundado	(e)	0.0004	0.0456	0.8247	0.0025	0.8950
SUE: Verde	(c)	0.0605	0.1075	0.6558	0.0103	0.5691
SAL	(f)	1.0143	0.1467	0.8618	0.0214	0.8195
VDA: Invierno	(b)	0.0085	0.0716	0.7566	0.0054	0.7996
VDA: Nieve*	(b)	0.0017	0.0558	0.7572	0.0029	0.4685
VDA: Verano	(a)	0.0203	0.0849	0.8512	0.0071	0.8119
BB	(c)	0.0412	0.0913	0.9194	0.0105	0.9391
AMO	(c)	0.0461	0.0957	0.9500	0.0104	0.9623

Tabla 5: Resumen de los  $z_0$  y  $C_{DN}$  para las diferentes fenologías considerados. \*Este periodo corresponde a un episodio de nieve. (a) Campo con matas, (b) Campo de matas con flores y hierbas o nieve que cubren el suelo antes desnudo, (c) Campo de espigas, pasto, hierba larga, (d) Campo de árboles esparcidos, (e) Campo inundado en el que crece arroz, (f) Bosque

Se compara las estaciones entre sí realizando pruebas F tanto para las regresiones lineales de las series de  $z_0$  y de  $C_{DN}$ . No siempre dan un mismo resultado y sólo consideramos que dos casos son un mismo escenario estadístico si hay una confianza inferior al 95% de que no son diferentes, tanto para  $z_0$  y  $C_{DN}$ . Teniendo en cuenta esto, y cuidando que tenga cierto sentido físico, comparamos los diferentes casos. La Laguna Seca es estadísticamente semejante a Gádor con espigas. Esto es llamativo puesto que la vegetación en Laguna Seca es de 20 cm y las espigas son de 1,2 m. No se observa diferencia entre el piornal nevado y sin nevar. Además tiene un arrastre comparable al de Lanjarón con los árboles en pie y Las Majadas. Éstos dos son totalmente comparables, aunque la longitud de rugosidad de las Majadas es superior pero también los árboles son más altos. En cambio, se observa que el otro bosque, El Saler, es mucho más rugoso debido a que hay una mayor densidad de árboles y son más altos.



Laguna Seca, SW



Laguna Seca nevada



Lanjarón con árboles



Lanjarón sin árboles



Las Majadas de Tiétar



El Saler

Por otro lado, vemos que todos los casos nevados son los semejantes estadísticamente. Seguramente se debe más a que las series son de pocos puntos, que a un sentido físico. De todas formas, se observa que el arrozal seco, sin plantar ni inundar, es tan liso como una superficie muy nevada. Cuando se inunda la superficie es muy lisa puesto que la superficie del agua estancada es más lisa que la de un matorral nevado. Pero cuando empieza a crecer el arroz, el cual crece rápidamente, la variación es muy grande. Aunque se considere como la espiga, tiene un arrastre semejante al de las Majadas y Lanjarón con los árboles en pie.



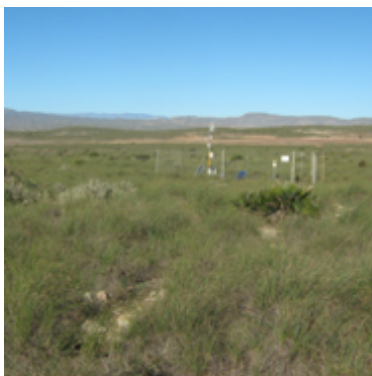
Sueca seco



Sueca inundado



Sueca verde



Balsa Blanca



Amoladeras

Se ve claramente la diferencia entre Lanjarón con los árboles en pie (de marzo a mayo de 2008) y con la mayoría de los árboles caídos (diciembre a marzo de 2010). Siendo el caso en que la mayoría de los árboles se han caído es semejante al de la Gádor con espigas, lo mismo que los son las estaciones de Cabo de Gata. Éstas se diferencian en el porcentaje de suelo cubierto por vegetación, diferencia que no se aprecia ni en la longitud de rugosidad ni en el coeficiente de arrastre.



Vall d'Alinya en invierno



Vall d'Alinya nevado



Vall d'Alinya en verano

Por último tenemos el pastizal en Vall d'Alinya. La vegetación es muy corta, de unos 10 cm, y bastante uniforme esto se refleja en un arrastre y una rugosidad bajas. En verano es cuando el ganado pasta y la hierba es más corta pero la rugosidad es mayor, posiblemente por la presencia del ganado.

#### Perfil de viento de Las Majadas: Cálculo de $d$ y $z_0$

Como ya se ha comentado en la estación de Las Majadas se disponen de tres anemómetros dispuestos en vertical a diferentes alturas, 5m, 9m y 15m, desde febrero de 2011 (trabajamos con medidas tomadas desde febrero hasta abril). Pero el primer anemómetro está mal situado, queda por debajo de la copa de los árboles. Al prescindir del primer anemómetro, sólo tenemos dos puntos, siendo imposible la aplicación de la ecuación (13). Además, no tiene sentido realizar una regresión lineal entre tan sólo dos puntos porque no hay posibilidad de conocer la bondad del ajuste.

## Discusión

Existen varias clasificaciones de rugosidad del terreno que se han realizado así como análisis sobre ellas (Davenport, 1960, Counhan, 1972, Wieringa, 1992) para compararlas y llegar a conclusiones que contengan toda la información. En este estudio vamos a comparar nuestros resultados con la clasificación que obtiene Wieringa, quien compiló la información de cerca de 50 experimentos antes realizados. (Wieringa, 1993) La siguiente tabla muestra esta clasificación.

$z_0$ (m)	Clasificación	Descripción del terreno	$C_{DN}$
$\leq 0.0002$	Mar	Agua en calma, llanuras nevadas	<b>0.0014</b>
<b>0.005</b>	Liso	Campos nevados	<b>0.0028</b>
<b>0.03</b>	Abierto	Terreno abierto y llano, hierba, algunos obstáculos aislados: $x/H \geq 50$	<b>0.0047</b>
<b>0.1</b>	Abierto rugoso	Cultivos bajos, grandes obstáculos ocasionales: $50 < x/H < 20$	<b>0.0075</b>
<b>0.25</b>	Rugoso	Cultivos altos, obstáculos dispersos: $20 < x/H < 15$	<b>0.012</b>
<b>0.5</b>	Muy rugoso	Parques, matorrales, obstáculos numerosos: $15 < x/H < 10$	<b>0.018</b>
<b>1</b>	Cerrado	Densa cobertura regular de obstáculos: bosques $x/H < 4$	<b>0.030</b>
<b><math>\geq 2</math></b>	Caótico	Bosques irregulares con claros	<b>0.062</b>

**Tabla 6: Clasificación de terrenos realizada por Wieringa (1993) aerodinámicamente descrita en término de la longitud de rugosidad  $z_0$  y el coeficiente de arrastre  $C_{DN}$ . El "x" representa la distancia característica entre obstáculos y "H" es la altura del obstáculo principal.**

Atendiendo a esta clasificación nuestros resultados quedan agrupados de la manera expuesta en la tabla 7. En ella se aprecia que el terreno más liso es el arrozal inundado,  $z_0=0.0004$  m y  $C_{DN}=0.0028$ . Esto era de esperar puesto que se trata de un tanque lleno de agua, una superficie plana y lisa. Al vaciar el tanque queda un campo de lodo sin vegetación bastante liso ( $z_0=0.0023$  m) aunque con ciertas imperfecciones que producen estelas muy pequeñas ( $C_{DN}=0.0032$ ).

Otro terreno muy liso es el valle d'Alinya nevado ( $z_0=0.005$  m), al tener una vegetación de no más de 10 cm de altura cuando nieva queda totalmente cubierta quedando una superficie lisa aunque no plana por tratarse de un valle abierto presenta un coeficiente de arrastre de terreno abierto no plano ( $C_{DN}=0.0029$ ). En cambio la superficie de Gádor nevado no es tan liso debido a que la nieve no llega a cubrir toda la vegetación. El Gádor nevado ( $z_0=0.0028$  m y  $C_{DN}=0.0045$ ) y el con vegetación más bajas que las matas ( $z_0=0.0018$  m y  $C_{DN}=0.0043$ ) son muy parecidos, aerodinámicamente, claro está. Esto se puede interpretar fácilmente si tenemos en

cuenta que lo que hace tanto la presencia de nieve como de las flores es ascender el suelo, es decir, reducir la altura de las matas. Así se suaviza la superficie.

Clasificación:		$z_0$		$C_{DN}$	Clasificación:	
$z_0$ (m)		(m)			$C_{DN}$	
$\leq 0.005$	Liso	0.0004	SUEinundado	0.0025	Liso	0.0028
		0.005	VDAnevado	0.0029		
		0.0023	SUEseco	0.0032	Abierto	0.0047
		0.0018	GADflores	0.0043		
		0.0028	GADnevado	0.0045		
0.03	Abierto	0.0085	VDAinvierno	0.0054	Abierto rugoso	0.0075
		0.0087	LAJnevado	0.006		
		0.0086	GADmatas	0.0061		
		0.0153	GADespigas	0.007		
		0.0203	VDAverno	0.0071	Rugoso	0.012
		0.019	LAS	0.01		
		0.0209	LASnevado	0.0101		
0.1	Abierto rugoso	0.0412	BB	0.0105	Rugoso	0.012
		0.0461	AMO	0.0104		
		0.0605	SUEverde	0.0103		
		0.079	LAJ2010	0.008		
0.25	Rugoso	0.2208	LAJ2008	0.0117	Cerrado	0.030
0.5	Muy rugoso	0.399	MAJ	0.0118		
1	Cerrado	1.0143	SAL	0.0214		

Tabla 8: Clasificación de los terrenos a estudio según la clasificación realizada por Wieringa (1993) aerodinámicamente descrita en término de la longitud de rugosidad  $z_0$  y el coeficiente de arrastre  $C_{DN}$ .

Al retirarse la nieve deja al descubierto el suelo y la vegetación. En el caso del pastizal en Alinyà ésta es baja y bastante uniforme, formada por hierbas, por lo que da lugar a un campo abierto muy liso ( $z_0=0.0085$  m y  $C_{DN}=0.0054$ ). Pero en Gádor se tienen matas de hasta 70 cm que producen mayor arrastre que las hierbas de Alinyà ( $z_0=0.0086$  m y  $C_{DN}=0.0061$ ).

Llama la atención que el piornal en Laguna Seca, con piornos de unos 20 cm, tengan un arrastre ( $C_{DN}=0.01$ ) igual al de campos de vegetación alta de aproximadamente 1 m (como Balsablanca, Amoladeras,  $C_{DN}=0.01$ ). Esto se debe a que la estación se encuentra dentro de una cuenca y se forman remolinos, además de los debidos a la fricción con el suelo, debido a la topografía de la cuenca. Esto hace que la subcapa rugosa ascienda, sea más profunda. Muestra de la existencia de remolinos topográficos es el coeficiente de arrastre tan elevado e independiente de la cobertura de la superficie,  $C_{DN(sin\ nieve)}=0.01$  y  $C_{DN(nevado)}=0.01$ . (Fu, Zhong, Whiteman, Horst, & Bian, 2010). Eso sí, la diferencia en la altura de la vegetación

queda reflejada en la longitud de rugosidad ( $z_{0(LAS)}=0.02\text{ m}$  y  $z_{0(BB)}=0.041\text{ m}$ ,  $z_{0(AMO)}=0.046\text{ m}$ ), la cual caracteriza los obstáculos. La diferencia de rugosidad entre Balsa Blanca y Amoladeras podría tomarse como reflejo de la diferencia de cobertura, siendo Balsa Blanca la más cubierta y menos rugosa, pero la diferencia es muy pequeña para considerarlo.

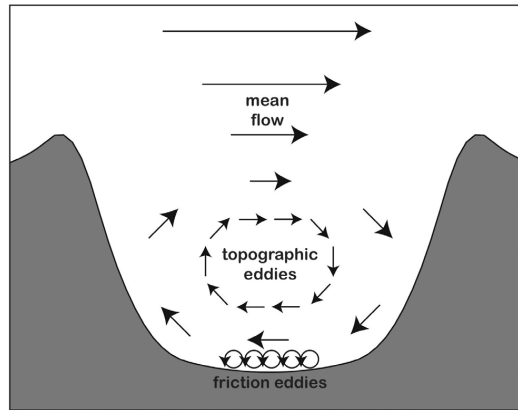
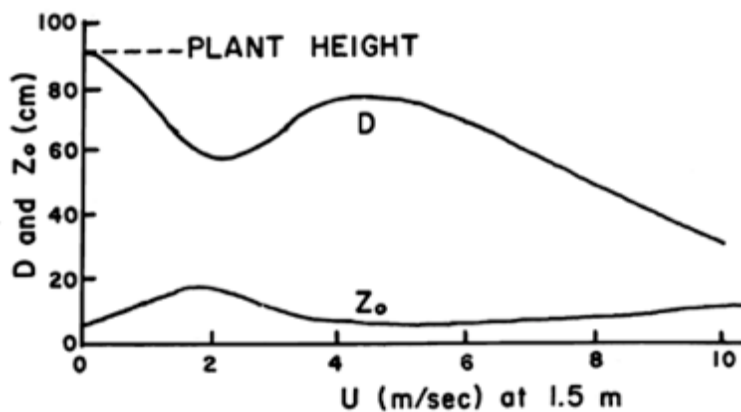


Ilustración 4: Dibujo conceptual de la generación de turbulencia en una cuenca. (Fu, Zhong, Whiteman, Horst, & Bian, 2010)

Algo parecido parece pasar en el Vall d'Alinyà. Pero aún siendo un valle, al ser sólo en verano cuando su rugosidad aumenta extraordinariamente ( $z_0=0.0203\text{ m}$  y  $C_{DN}=0.0071$ ), a dimensiones comparables con la de los campos de vegetación de más de un metro, se debe tener en cuenta otras posibles causas. En este caso, una posible causa del aumento de la rugosidad en verano puede ser debido a la presencia de ganado, de hasta 1,30 m de altura, que pasta en estos campos desde junio hasta octubre. Esto es difícil de controlar, cuantificar, caracterizar y tal vez existan otros factores no controlados.

Las espigas de las gramíneas son tallos largos, de unos 1,2 m, finos y muy flexibles. Y aunque nos da dentro de la categoría de campo de vegetación larga ( $z_0=0.0153\text{ m}$  y  $C_{DN}=0.0070$ ), los resultados son ambiguos al compararlos con el campo de matas. Antes de agrupar los datos estadísticamente semejantes parecía menos rugoso que cuando en Gádor dominan las matas. Pero resulta que al considerar todos los datos del campo de espigas es más rugoso que el campo de matas. Esto se debe a que las espigas se doblan, giran y vibran con el viento variando el espesor del dosel, y causando una variación en el coeficiente de arrastre. Esto mismo ocurre con el arroz ( $z_0=0.0605\text{ m}$  y  $C_{DN}=0.0103$ ), de ahí la gran dispersión de la serie ( $R^2\approx 0.6$ ). Por lo tanto dependen de diverso factores como

son la velocidad y dirección del viento entre otros. Lo idóneo sería medir a una altura 3 veces la altura de la vegetación (Chang, 2009). Así se garantiza que el anemómetro está fuera de la subcapa en la que parte del transporte vertical de la cantidad de movimiento horizontal es no turbulento, y además los gradientes de viento están influenciados por la difusión de la estela. Dando valores no representativos de  $z_0$ ,  $u^*$  y  $C_{DN}$ , sobrestimados o subestimados dependiendo de la localización de la estación dentro de la estela (Wieringa, 1993).



**Ilustración 5:** Cambio de la rugosidad y la altura de desplazamiento, con la velocidad del viento a una altura de 1.5 m sobre un arrozal de 90 cm de altura. (Chang, 2009)

Otro caso de la categoría rugosa es Lanjarón con los árboles caídos,  $z_0=0.079$  m y  $C_{DN}=0.008$ ). En marzo de 2010 ya se habían caído el 97,4% de los árboles por lo que ha dejado de ser un bosque para formar un campo con algunas matas y árboles caídos. Esto es un campo rugoso son elementos de diferentes alturas, las matas, los árboles caídos y algunos todavía en pie. Esto contrasta con la situación de 2008 ( $z_0=0.2208$  m y  $C_{DN}=0.0117$ ), en el que el 88.7% (940 árboles/ha) de los árboles se mantenía en pie. El arrastre de entonces era comparable con el de la dehesa en Las Majadas de unos 25 árboles/ha,  $C_{DN}=0.0118$ . En Las Majadas hay mucho menos árboles que en Lanjarón pero estos son mucho más frondosos y altos, los de Lanjarón estaban quemados y esto se refleja en la longitud de rugosidad ( $z_{0(LAJOB)}=0.2208$  m y  $z_{0(MAJ)}=0.399$  m). En El Saler tampoco hay demasiados árboles (70 árboles/ha) aunque más del doble que en la dehesa y más altos, cosa que se refleja en la rugosidad,  $z_0=1.0143$  m, y el arrastre,  $C_{DN}=0.0214$ . Se entiende que estas comunidades de árboles son uniformes porque de lo contrario tanto la longitud de rugosidad como el coeficiente de arrastre serían más altos.



Para Las Majadas se tenía la posibilidad de calcular la longitud de rugosidad a partir del perfil de viento. Uno de los anemómetros está a 5 m por debajo de la copa de los árboles entre los árboles. Teniendo en mente el perfil de viento en áreas bocosas (ilustración 2) este anemómetro está fuera del perfil logarítmico del viento que nos interesa, el por encima del dosel. Generalmente se recomienda una altura de medición  $\geq 20z_0$ . En este caso sería de unos 8 m. (Wieringa, 1993)

## Conclusiones

Se ha observado que la longitud de rugosidad depende sobre todo de las características de la vegetación, como son la forma, altura y la cobertura o densidad. Siendo independiente de la estabilidad y de la velocidad del viento, salvo en el caso de la vegetación alta y flexible. Mientras que el coeficiente de arrastre depende de la estabilidad, de la rugosidad y de la altura de medida. Entonces la longitud de rugosidad pone de manifiesto la aspereza de la superficie y el coeficiente de arrastre nos informa de cómo el flujo de aire “ve” el terreno. Consecuentemente ambos parámetros están interrelacionados, como se puede deducir de las ecuaciones.

Salvo pequeñas peculiaridades, se advierte que en superficies lisas tales como el agua, la nieve y el lodo están relativamente muy expuestas al viento, pero el efecto de la superficie sólo se extiende a una pequeña altura sobre la superficie puesto que no hay obstáculos formando estelas. En los terrenos abiertos rugosos con obstáculos aislados hay arrastre de forma que produce una estela que se disipa en el espacio entre los obstáculos y la longitud de rugosidad es pequeña. En las superficies rugosas las estelas individuales de los diferentes obstáculos se superponen, o las estelas topográficas, hacen la capa rugosa más profunda. En terrenos cerrados, donde la distancia relativa entre los obstáculos es inferior a tres veces la altura media de los obstáculos, el flujo bajo el dosel tiene un régimen separado al flujo por encima del dosel. Una excepción a esto son los obstáculos flexibles que tienen la capacidad de modificar la densidad del dosel dependiendo de la velocidad del viento. Luego es necesario un estudio más exhaustivo de este caso atendiendo a las distintas velocidades del viento. Además se debería ascender el anemómetro 1 m para garantizar que se encuentra por encima de las estelas.

También se debería tener en cuenta que para los terrenos muy rugosos y cerrados, en los que la longitud de rugosidad es grande, la determinación de la altura de desplazamiento es necesaria para el análisis y modelización de los perfiles de viento cerca de la superficie del dosel. Generalmente, éste se aproxima a partir de las propiedades de los obstáculos, tales como la altura, el área frontal o el índice de área foliar. Pero esto no es correcto en los lugares con topografía o terreno complejo y heterogéneo, puesto que éste mismo produce remolinos debido

al arrastre de forma. Por lo que longitud de rugosidad calculada para Lanjarón en 2008, Las Majadas y El Saler está subestimada.

Con el fin de evitar los problemas de falta de datos en los episodios de nevadas se recomienda complementar los paneles solares con microaerogeneradores, de esta forma no se perderían datos en los períodos nublados o nevados prolongados.

Hay que destacar que sin tener información detallada de la población vegetal de cada sistema se han obtenido resultados cualitativamente satisfactorios. Para poder afirmar si los resultados son cuantitativamente buenos sería interesante poder verificarlos realizando en el futuro un seguimiento de la fenología de cada ecosistema. Se podría registrar la fecha aproximada de floración, altura y densidad de ésta de forma regular además de la altura de la nieve.

## Agradecimientos

Este trabajo ha sido posible gracias al gran apoyo recibido por Andy, por su orientación, dedicación, revisiones de última hora a contrarreloj y mucho más. Gracias a Penélope, Borja y Enrique por ofrecerme toda su ayuda, respondiendo todas mis dudas y pasándome todos los datos calculados por ellos. Estos datos fueron medidos gracias a la financiación por varios proyectos: el proyecto andaluz GOECARBO (P08-RNM-3721), los proyectos nacionales Carbored-II (CGL2010-22193-C04-02) y INIA (SUM2006-00010-00-00) y el proyecto GHG-Europe del VII programa marco de la comisión europea (“grant agreement” 244122).

## Bibliografía

- Anderson, W., & Meneveau, C. (2010). A Large-Eddy Simulation Model for Boundary-Layer Flow Over Surfaces with Horizontally Resolved but Vertically Unresolved Roughness Elements. *Boundary-Layer Meteorology*, 137, 397–415.
- Arya, S. (2001). *Introduction to micrometeorology*. London: Academic Press.
- Bache, D. H., & Johnstone, D. R. (1992). *Microclimate and spray dispersion*. Chichester: Ellis Horwood Limited.
- Bohrer, G., Katul, G. G., Walko, R. L., & Avissar, R. (2009). Exploring the Effects of Microscale Structural Heterogeneity of Forest Canopies Using Large-Eddy Simulations. *Boundary-Layer Meteorology*, 132, 351–382.
- Bradley, E. F. (1971). THE INFLUENCE OF THERMAL STABILITY ON A DRAG COEFFICIENT MEASURED CLOSE TO THE GROUND. *Agricultural Meteorology*, 9, 183-190.
- Casals, P., Gimeno, C., Carrara, A., Lopez-Sangil, L., & Sanz, M. (2009). Soil CO<sub>2</sub> efflux and extractable organic carbon fractions under simulated precipitation events in a Mediterranean Dehesa. *Soil Biology & Biochemistry*, 41, 1915-1922.
- Castro, M., González, R., & Portela, A. (1991). Parametrización de la capa límite atmosférica en los modelos numéricos de pronóstico meteorológico. *Física cielo Tierra*, 3, 103-138.
- Chang, J.-H. (2009). *Climate and agriculture: an ecological survey*. Chicago: Aldine.
- Committee on Hydrology. (1996). *Hydrology Handbook*. Danvers, Massachusetts: ASCE.
- Dolman, A. (1986). Estimates of roughness length and zero plane displacement for a foliated and non-foliated oak canopy. *Agriculture and Forest Meteorology*, 36, 241-248.
- Fu, P., Zhong, S., Whiteman, D., Horst, T., & Bian, X. (2010). An observational study of turbulence inside a closed basin. *Journal of Geophysical Research*, 115, 23106-23121.
- Garratt, J. (1977). Reviews of drag coefficients over oceans and continents. *Monthly weather review*, 105, 915-930.
- Grant, A. L. (1991). SURFACE DRAG AND TURBULENCE OVER AN INHOMOGENEOUS LAND SURFACE. *Boundary-Layer Meteorology*, 56, 309-337.
- Hatfield, J. I. (1989). AERODYNAMIC PROPERTIES OF PARTIAL CANOPIES. *Agricultural and Forest Meteorology*, 46, 15-22.
- Jacobs, A., & van Boxel, J. (1988). CHANGES OF THE DISPLACEMENT HEIGHT AND ROUGHNESS LENGTH OF MAIZE DURING A GROWING SEASON. *Agricultural and Forest Meteorology*, 42, 53-62.
- Lu, L., Liu, S., Xu, Z., Yang, K., Cai, X., Jia, L., y otros. (2009). The characteristics and parameterization of aerodynamic roughness length over heterogeneous surfaces. *Adv. Atmos. Sci.*, 26, 180–190.

- López, G. (1987). *Flora iberica* (Vol. 4). Madrid: Castroviejo & al.
- Marañón-Jiménez, S., Castro, J., Kowalski, A., Serrano-Ortiz, P., Reverter, B., Sánchez-Cañete, E., y otros. (2011). Post-fire soil respiration in relation to burnt wood management in a Mediterranean mountain ecosystem. *Forest Ecology and Management* .
- Nakai, T., Sumida, A., Daikoku, K., Matsumoto, K., van der Molen, M. K., Kodama, Y., y otros. (2008). Parameterisation of aerodynamic roughness over boreal, cool- and warm-temperate forests. *Agricultural and forest meteorology* , 148, 1916-1925.
- Palacios, J. (1964). *Análisis dimensional*. Madrid: Espasa-Calpe.
- Patiño, J., León Peláez, J., Montes, A., & Hernández, L. (2007). Propuesta Metodológica Para Comparar el Efecto de Diferentes Coberturas Vegetales en la Regulación de Caudales en cuencas Hidrográficas. *Avances en recursos hidráulicos* , 15, 89-101.
- Pereira, A., & Shaw, R. (1982). AERODYNAMIC ROUGHNESS OF A PLANT CANOPY: A NUMERICAL EXPERIMENT. *Agricultural Meteorology* , 26, 51-65.
- Queck, R., & Bernhofer, C. (2010). Constructing wind profiles in forests from limited measurements of wind and vegetation structure. *Agric. For. Meteorol.* , 150, 724-735.
- Raupach, M. (1994). Simplified expressions for vegetation roughness length and zero-plane displacement as functions of canopy height and area index. *Boundary-Layer Meteorology* , 71, 211-216.
- Reverter, B., Sánchez-Cañete, E., Resco, V., Serrano-Ortiz, P., Oyonarte, C., & Kowalski, A. (2010). Analyzing the major drivers of NEE in a Mediterranean alpine shrubland. *Biogeosciences* , 7, 2601-2611.
- Rey, A., Pegoraro, E., Oyonarte, C., Were, A., Escribano, P., & Raimundo, J. (2010). Impact of land degradation on soil respiration in a steppe (*Stipa tenacissima* L.) semi-arid ecosystem in the SE of Spain. *Soil Biology & Biochemistry* , 1-11.
- Schmid, H. (2002). Footprint modeling for vegetation atmosphere exchange studies: a review and perspective. *Agriculture and Forest Meteorology* , 113, 159-183.
- Serrano-Ortiz, P., Kowalski, A. S., Domingo, F., Rey, A., Pegoraro, E., Villagarcía, L., y otros. (2007). Variations in daytime net carbon and water exchange in a montane shrubland ecosystem in southeast Spain. *Photosynthetica* , 45, 30-35.
- Stull, R. B. (1999). *An introduction to boundary layer meteorology*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- Valdés, B., Talavera, S., & Fernández-Galiano, E. (1987). *Flora Vascular de Andalucía Occidental* (Vol. 3). Sevilla: Ketres.
- Wieringa, J. (1993). Representative roughness parameters for homogeneous terrain. *Boundary Layer Meteorology* , 63, 323-363.







## Apéndices

### I. Clima de los ecosistemas

#### *Llano de los Juanes, Sierra de Gádor (Matorral)*

Climatológicamente el área presenta valores medios de precipitación y temperatura anual media de 475 mm y 12°C, respectivamente. La precipitación tiene lugar fundamentalmente durante las estaciones de otoño e invierno, siendo el verano extremadamente seco, debido a la presencia del anticiclón subtropical. Los vientos predominantes vienen de norte noreste durante el día (45% del viento del día) y del sur durante la noche (52%).

#### *Laguna Seca, Sierra Nevada (Piornal)*

El clima es mediterráneo de alta montaña con inviernos fríos y lluviosos y veranos templados y secos. La precipitación y temperatura media anual es de unos 800 mm y 5.5°C respectivamente. Suele estar cubierto de nieve de diciembre a marzo. Durante un mes aproximadamente la laguna permanece inundada de agua procedente del hielo. El resto del año la laguna permanece seca.

#### *Loma de Lanjarón, Sierra Nevada (Bosque quemado)*

El clima es mediterráneo de montaña, con precipitaciones concentradas, en forma de nieve, en invierno, alternándose con veranos muy cálidos y secos. La nieve persiste desde diciembre a marzo. La temperatura media es de 8.4°C y la precipitación media anual es de 678 mm. El viento dominante es del suroeste debido a su orientación.

#### *Las Majadas de Tietar, Cáceres (Dehesa)*

El clima es mediterráneo continental con temperatura media anual de 16,7°C y precipitación media anual de 528 mm, menos del 6% de la precipitación ocurre durante el verano. El viento dominante proviene del suroeste y del nordeste.

#### *Sueca, Valencia (Arrozal)*

El clima es mediterráneo, con lluvias estacionales (465 mm media anual) y temperaturas cálidas en verano (temperatura media del mes más cálido de 23°C y

de media anual 18°C). Prevalecen los vientos del este y oeste de forma que el fetch es de 2 km.

*El Saler, Valencia (Bosque)*

El clima es mediterráneo de suaves temperaturas (18°C) y precipitaciones medias anuales de 550,7 mm, siendo éstas estacionales. Los vientos dominantes son los procedentes del este y del oeste.

*Vall d'Alinya, Prat Major, Lleida (Pastizal)*

Tiene clima atlántico templado y húmedo caracterizado por veranos suaves, de 6,1°C y 1050 mm de temperatura y precipitación media anual, respectivamente. El viento del norte domina sobre las demás direcciones.

*Balsa Blanca y Amoladeras, Cabo de Gata (matorral)*

El clima en esta área es subtropical, seco, y semiárido con una precipitación media anual de 250 mm y una temperatura media anual de aproximadamente 18°C, caracterizado por prolongadas sequías en verano (desde mayo a septiembre, sin lluvia, en general, desde junio hasta septiembre). Los sitios se caracterizan por una fuerte variación interanual y patrones de precipitación muy variable que casi siempre ocurre en primavera y otoño.

## II. Vegetación de los ecosistemas

### *Llano de los Juanes, Sierra de Gádor (Matorral)*

El matorral está formado por una comunidad vegetal denominada lastonar representado por dos especies vegetales dominantes *Festuca scariosa* (19%) y *Genista pumila ssp. Pumila* (15%). Acompañan *Hormatophylla spinosa* (L.) P. K pfer, (6.30 %), *Thymus serpylloides* Bory (5%), *Phlomis lychnitis* L. (3.3%) y otras como *Lav ndula lanata* Boiss, *Salvia lavandulifolia* Vahl., y *Eryngium campestre* L. Esporádicamente y localizados en posiciones muy particulares (fondos de dolinas o microvalles) aparecen elementos propios de la comunidad seral como *Quercus rotundifolia*, *Crataegus monogyna*, *Juniperus oxycedrus* y *Asparagus acutifolius*. Cubren en total una media de 46,7% del suelo. Las *Festuca scariosa* es una gramínea cuyo limbo mide unos 70 cm de longitud y los tallos, cuando florecen de mayo a julio, crecen hasta 1,2 m. (Valdés, Talavera, & Fernández-Galiano, 1987) Su LAI (Leaf Area Index,  ndice de área foliar) varía según su fenología desde 0,9 a 2,47 m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>. La *Genista pumila ssp. Pumila* es un arbusto o sufr tice 0,05-0,6(0,7) m, erecto, muy intrincado, espinoso, con tallos divaricados, cortos, gruesos y terminados en una espina fuerte y punzante, con pocas hojas durante la floración. Ésta tiene lugar entre abril y mayo aunque ocasionalmente se puede retrasar hasta junio o julio. Su LAI varía desde 1,43 a 2,98 m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup> según su fenología. (Valdés, Talavera, & Fernández-Galiano, 1987). La *Hormatophylla spinosa* es una mata leñosa, muy ramificada desde la base, espinosa, que forma almohadillas de hasta 30 cm de altura con flores, que crecen entre abril y junio, de unos 5 mm, blancos o rosas. Esta fenología hace que su LAI varíe desde 1,42 a 3,03 m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>. La *Thymus serpylloides* Bory es una planta sufruticosa, aromática, con una altura de hasta de 20 cm. Florece de mayo a agosto, variando de esa forma su LAI de 1,49 a 3,17 m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>. La *Phlomis lychnitis* L. es una mata sufruticosa en la base, de 20 a 50 cm de porte, con tallos y hojas cubiertos por un tomento blanquecino. Florece de mayo a julio, variando el LAI de 0 a 2,47 m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>.



**Imagen 1:** *Festuca scariosa*, *Genista pumila ssp. Pumila*, *Hormatophylla spinosa*, *Thymus serpylloides* Bory

#### *Laguna Seca, Sierra Nevada (Piornal)*

En el piornal predominan las especies *Festuca indigesta* y *Cytisus purgans*, alcanzando una altura de 20 cm y cubriendo homogéneamente el 45% del suelo. El 35% restante corresponde al lecho quedando un 20% del suelo desnudo. La presencia de otras especies es intermitente durante el año y muy escasa. El LAI es prácticamente constante durante todo el año de 1,23 m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>. ( Reverter, Sánchez-Cañete, Resco, Serrano-Ortiz, Oyonarte, & Kowalski, 2010)

#### *Loma de Lanjarón, Sierra Nevada (Bosque quemado)*

Antes del incendio había un bosque de pinos (*Pinus sylvestris*) de 35 a 45 años. La densidad de árboles era de 1060 ± 50 ha<sup>-1</sup>, con una altura media de 6,36 ± 0,06 m y una d.b.h. (diameter at breast height) de 13.34 ± 0.17 cm. Ningún árbol sobrevivió al incendio. Han ido cayendo progresivamente a lo largo de los años (a principios del 2009 aún quedaban en pie el 75% de los árboles). Actualmente, casi no quedan árboles en pie y la vegetación está compuesta mayoritariamente por herbáceas con una cobertura de un 75% aprox. Las especies perenes más comunes son *Genista versicolor*, *Festuca spp.*, y *Sesamoides prostrata*. (Marañón-Jiménez, et al., 2011). El *Genista versicolor* es un piorno amarillo de 30 a 70 cm que florece entre julio y agosto. La *Festuca spp.* es una planta perenne, raramente bienal, a menudo glauca; cepa generalmente ramificada, leñosa, de ramas postradas, no radicantes de unos 20 cm. (López, 1987) Esta vegetación cubre aproximadamente el 61% y tiene una altura media de unos 19,5 cm.

#### *Las Majadas de Tietar, Cáceres (Dehesa)*

El estrato abierto de árboles (24,8 ha<sup>-1</sup>) está compuesto por encinas de bellotas amargas (*Quercus ilex ssp ballota Lam.*) con la presencia esporádica de *Q. suber L.* o *Q. faginea Lam.* (< 5%) de 80 a 100 años. La fracción del dosel es del 20% cuya altura media es de 8 m y el d.b.h. medio es de 45 cm. El estrato herbáceo está compuesto principalmente por especies: *Vulpia bromoides (L.) SF Grey*; *V. geniculata (L.) Link*; *Trifolium sub-terraneum L.*, *Ornithopus compressus L.*. Las plantas herbáceas envejecen para finales de mayo. Durante todo el año es pasto para reces (160 cabezas Avileña) y ovejas (420 cabezas Merina) y en verano se produce la transhumancia del 50% del ganado de las montañas cercanas. El LAI

medio de las Majadas es de 2,5 m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>. (Casals, Gimeno, Carrara, Lopz-Sangil, & Sanz, 2009)

#### *Sueca, Valencia (Arrozal)*

Se trata por lo tanto de un ecosistema agrícola con un monocultivo. El manejo está determinado por el cultivo. Los campos permanecen secos de enero a abril realizándose las tareas de fango y arado, en el mes de mayo se inundan para proceder a la siembra. La altura del arroz varía desde 0 cm, al ser sembrado, hasta unos 70 cm, variando el LAI desde 0 hasta 5 m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>. A mediados de agosto vuelven a secarse para proceder a la recolección a mediados de septiembre, y se vuelven a inundar en noviembre. La torre está situada en un "tancat", se denominan así los campos circundantes al lago de la Albufera, cuyo nivel de inundación está determinado por el nivel de agua del lago. La inundación de los campos se consigue elevando el nivel del lago por medio de compuertas, mientras que el drenaje tiene que realizarse por medio de motores.

#### *El Saler, Valencia (Bosque)*

La mayor parte de la superficie de este ecosistema esta cubierta por una maquia alta (1 a 2 m de altura) y pinos (10 a 12 m de altura). La especie de pino dominante es *Pinus halepensis* (pino carrasco), mezclado con algunos ejemplares dispersos de *Pinus pinea* (pino piñonero). Alrededor de la torre (un andamio de 12 m) se encuentran ejemplares de pino carrasco (*Pinus halepensis*) de aproximadamente 11 m de altura y de 50 a 100 años de edad. Hay 70 árboles/ha con un d.b.h. medio de 31,8 cm. Las principales especies de la maquia son *Quercus coccifera*, *Rhamnus alaternus*, *R. lycioides*, *Pistacia lentiscus*, *Smilax aspera*, *Ruscus aculeatus*, *Phyllirea angustifolia*, *Myrtus communis*, *Erica multiflora*, *Osirys quadripartita*, *Chamaerops humilis*, *Cistus albidus* y *Cistus salviifolius*, las cuales tienen una altura media de 1,5 m. El LAI del conjunto es de 2,63 m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>.

#### *Vall d'Alinya, Prat Major, Lleida (Pastizal)*

Se trata de un pastizal situado en un valle dominado por especies herbáceas: *Festuca ovina* (55%), *Festuca rubra ssp commutata* (15%), *Potentilla pneumoniana* (7,5%), *Phleum pratense* (5,5%), *Thymus serpyllum* (4,5%), con algunos arbustos aislados (*Juniperus communis*) y rodeada de bosques de *Pinus*

*uncinata*. En el valle el ganado pasta desde mediados de junio a mediados de octubre por lo que la altura de la vegetación varía a lo largo del año de 0,05 a 0,1 m. Tiene un LAI máximo de 2,47 m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>.

*Balsa Blanca y Amoladeras, Cabo de Gata (matorral)*

La vegetación de estos sitios esta dominada por *S. tenacissima* (con altura media entre 60 y 100 m), pero hay un gran número de otras especies herbáceas más cortas en baja densidad, tales como: *Chamaerops humilis*, *Rhamnus lycioides*, *Asparagus horridus*, *Olea europea var. sylvestris*, *Pistacia lentiscus*, y *Rubia peregrina*. La *S. tenacissima* L. es una herbácea perene altamente adaptada a condiciones de escasez de agua. El ecosistema se caracteriza por áreas abiertas libres de vegetación, con una cobertura vegetal de 23% en Amoladeras y 63% en Balsablanca. (Rey, Pegoraro, Oyonarte, Were, Escribano, & Raimundo, 2010)

### III. Imágenes del Llano de los Juanes, Sierra de Gádor

Aquí se presentan algunas imágenes que se describen en la sección de resultado, para el estudio de Gádor.



15.6.04



2.12.04



10.2.05



23.6.05



30.3.06



31.5.06



23.11.06



18.6.07



12.12.07



16.6.08

#### IV. Resultados del estudio estadístico

Realizamos la prueba F de forma que consideramos un nivel de confianza del 0,05 (valor  $p$ ), es decir, cuando  $p < 0,05$  consideramos las pendientes de las regresiones lineales calculadas diferentes al nivel de confianza del 95%. Sólo se tuvo en cuenta, y se agrupaban los datos en una nueva serie, cuando  $p > 0,05$  tanto para  $z_0$  como para  $C_{DN}$  y si tienen sentido físico. En las siguientes tablas se presentan los valores de  $p$  expresados en %.

#### Estudio cronológico del matorral en la Sierra de Gádor

$z_0 \setminus C_{DN}$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1		0	90	0	0	36	6	0	0	0	0
2	0		0	0	95	3	0	24	0	0	0
3	10	0		0	0	36	6	0	0	0	0
4	0	0	14		0	0	5	19	0	0	0
5	0	0	0	0		0	0	0	0	0	47
6	78	86	44	13	0		9	0	0	0	0
7	21	0	78	49	0	49		70	0	0	0
8	16	91	0	0	0	25	90		0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0
10	0	0	0	24	0	0	8	0	0		0
11	0	0	0	0	26	0	0	0	0	0	

Tabla 1: Valores de  $p$ , resultado del test F, para los diferentes periodos entre jun04 y dic08, de datos de la Sierra de Gádor. Corresponde: 1: verano04; 2: invierno0405; 3: verano05; 4: invierno0506; 5: verano06; 6: invierno0607; 7: primavera07; 8: verano07; 9: invierno0708; 10: verano08; 11: nevada febrero05



## Estudio de todas las estaciones según sus fenologías

z0\CDN	G1	G2	G3	G4	LS1	LS2	LJ1	LJ2	LJ3	MJ	S1	S2	S3	SL	V1	V2	V3	BB	AM
G1		0	0	0	0	0	0	1	23	0	0	0	0	0	0	0	67	0	0
G2	0		0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	54	0	19	0	0.9	0	0
G3	7	0		94	0	0	0	0	20	0	0	0	23	0	0	0	3	0	0
G4	29	79	5		0	0	0	41	2	0	0	0	33	0	13	0	0	0	0
LS1	43	0	59	19		85	3	0	0	0	0	0	95	0	0	0	0	28	6
LS2	26	0	92	16	76		4	0	0	0	0	0	92	0	0	0	0	39	16
LJ1	0	0	0	5	0	0		0	0	0	0	0	73	0	0	0	0.2	3	0
LJ2	0	59	0	76	0	0	0		0	0	0	0	36	0	7	0	23	0	0
LJ3	35	0	71	38	90	87	0	0		21	0	0	88	0	0	0	45	0	0
MJ	0	0	0	0.1	0	0	0.4	0	0		0	0	58	0	0	0	0	0	0
S1	0	22	0	36	0	0	0	86	0	0		0	0	0	1	0	0	0	0
S2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0.1	0	0	0	0
S3	0	0	0	0	0.1	0.3	86	0	15	88	0	0		10	0	0	0.2	95	1
SL	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0
V1	3	0	0	42	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0
V2	0	43	0	50	0	0	0	86	0	0	53	0	0	0	0		0	0	0
V3	14	0	77	1	54	78	0	0	76	0	0	0	0	0	0	0		0	0
BB	0	0	0	2	3	6	0	0	4	0	0	0	1	0	0	0	9		70
AM	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	0	0	0	0	0	

**Tabla 2: Valores de p, resultado del test F, para las diferentes fenologías ocurridas en todas las estaciones estudiadas. Corresponde: G1: Gádor con matas; G2: Gádor con flores; G3: Gádor con espigas; G4: Gádor nevado; LS1: Laguna Seca; LS2: Laguna Seca nevada; LJ1: Lanjarón en 2008; LJ2: Lanjarón nevado; LJ3: Lanjarón 2010; MJ: Las Majadas; S1: Sueca seco; S2: Sueca inundado; S3: Sueca verde; SL: El Saler; V1: Vall d'Alinyà en invierno; V2: Vall d'Alinyà nevado; V3: Vall d'Alinyà en verano; BB: Balsa Blanca; AM: Amoladeras**