III Reunión conjunta del Grupo de Trabajo de Repoblaciones Forestales (SECF)
y el Grupo de Trabajo de Restauración Forestal (AEET)

Viabilidad económica de los microrriegos en repoblaciones

Del Río San José, J.¹, Reque Kilchenmann, J.², Martínez de Azagra Paredes, A.³

¹Junta de Castilla y León. Delegación Territorial de Valladolid. Servicio Territorial de Medio Ambiente.
Duque de la Victoria, 8. 47001 Valladolid (riosanjo@jcyl.es)*

²Instituto Universitario de Gestión Forestal Sostenible. E. T. S. de Ingenierías Agrarias. Universidad de Valladolid.
Avenida de Madrid, 44. 34004 Palencia (requekch@pvs.uva.es)

³Unidad Docente de Hidráulica e Hidrología Forestal. E.T.S. de Ingenierías Agrarias. Universidad de Valladolid.
Avenida de Madrid, 44. 34004 Palencia (amap@iaf.uva.es)

*Autor para correspondencia: riosanjo@jcyl.es

Resumen

Actualmente existe una amplia gama de sistemas de microrriego con los que evitar la mortandad por estrés hídrico en la plantación de brinzales. El coste económico adicional que supone la utilización del microrriego plantea la duda de cuándo es económicamente ventajosa su aplicación. Para responder a esta pregunta se presenta un modelo económico general, denominado *MThreshold*, que determina si interesa (o no) irrigar los brinzales frente a la técnica tradicional de reposición de marras.

El modelo que proponemos plantea un sistema de ecuaciones coste-beneficio y de estrategia de reposición de planta para hallar el valor del umbral de marras con el cual ambas alternativas ofrecen el mismo resultado económico. Al comparar este valor con el nivel de marras esperado en la repoblación si no se aplican microrriegos, el gestor puede tomar una decisión razonada en favor de una de las dos alternativas.

Se aplica el modelo *MThreshold* a trece casos prácticos que abarcan un amplio abanico de repoblaciones con distinta finalidad. A partir de los resultados obtenidos se realiza una clasificación no supervisada que identifica cuatro grupos de aptitud de las plantaciones forestales para el microrriego de brinzales.

Los microrriegos resultan competitivos cuando las marras esperadas sean importantes y/o cuando el valor del umbral de marras sea bajo. Esta última circunstancia ocurre en plantaciones con una tolerancia de marras exigente que vayan a tener una elevada renta anual, en las que las plantas de repoblación tengan un precio elevado o si la preparación del terreno resulta costosa.

Los resultados de *MThreshold* muestran cómo las marras pueden dejar de ser un simple estándar técnico e integrarse en la gestión del riesgo de marras en las repoblaciones.

Palabras clave: Plantaciones; Cuidados culturales; Riegos; Supervivencia; Marras; Modelo *MThreshold*.

1. Introducción

La condición necesaria, imprescindible pero no suficiente, para conseguir el éxito inicial de una plantación forestal es conseguir que los brinzales sobrevivan y crezcan con independencia de cuál sea la finalidad de la plantación. Para conseguir la supervivencia del brinzal es necesario su arraigo (Mattoon, 1998) y el crecimiento de la raíz a una profundidad que sea suficiente para garantizar su autonomía hídrica ante los periodos sin lluvias de la estación forestal. Por este motivo, la cantidad de brinzales que sobreviven continúa siendo el estándar técnico aceptado para medir el cumplimiento de este objetivo inicial (Vallejo *et al.*, 2012), y un indicador muy difundido en el control de calidad de los trabajos de restauración efectuados.

En la actualidad el porcentaje de marras se utiliza también como indicador para determinar si es necesario replantar (reponer marras), lo cual sucede cuando los valores observados de marras *MR_o* son superiores al nivel admisible de marras, *ALF* (Serrada *et al.*, 2005). Cuando las marras observadas son elevadas, persistentes en el tiempo y es posible identificar su causa, el procedimiento de trabajo más habitual es recurrir a acciones correctoras mediante la aplicación de cuidados culturales.

La reposición de marras es una corrección temporal inmediata, aunque incierta en su éxito, mientras que los cuidados culturales son acciones correctoras permanentes con alto grado de eficacia pero económicamente costosas. A pesar de estas diferencias, ambas soluciones son hoy en día parte de un modelo de gestión del riesgo de marras a posteriori que impide mejorar el desempeño de la acción repobladora debido a la incertidumbre sobre la inversión económica necesaria para conseguir el establecimiento de los brinzales.

Ante esos inconvenientes surge la necesidad de buscar un cambio en el procedimiento de trabajo actual que propicie una gestión preventiva y proactiva del riesgo de fracaso en las repoblaciones. Para explorar cómo responder a esta cuestión este artículo presenta un modelo aplicado al caso de estudio del microrriego de brinzales.

1.1 Soluciones técnicas a las marras por estrés hídrico

En repoblaciones bajo clima árido es común contar, ya en el propio diseño y proyecto de las mismas, con mortalidades superiores al 40%, por lo que se abordan frecuentemente costosas medidas de sustitución de las plantas muertas o ausentes, por nuevos ejemplares, en las mismas condiciones definidas para la plantación original.

En tales zonas, la estrategia repobladora clásica para disminuir la mortalidad por sequía se centra en la preparación del terreno que, desde un punto de vista hidrológico, persigue dos objetivos fundamentales: sistematizar el terreno para aprovechar y concentrar la escorrentía superficial; y modificar las características edáficas en términos de un aumento de la capacidad de retención de agua del perfil. De esta forma se consigue el desarrollo del sistema radical para un mejor aprovechamiento de los pulsos hídricos erráticos e intensos habituales en estas zonas. Esta alteración

del terreno se traduce en una *oasificación* que disminuye la severidad y la duración de la sequía (Martínez de Azagra *et al.*, 2006).

Otras técnicas aplicadas comúnmente para disminuir la mortalidad de plántulas por estrés hídrico son: el control de la vegetación competidora, especialmente herbácea; la utilización de protectores capaces de propiciar a la plántula un microambiente hídrico más favorable; o la simple protección de la base de la plántula con piedras o placas de acolchados para disminuir la evaporación de agua del suelo y la competencia herbácea (Reque and Bravo, 1993; Jiménez *et al.*, 2013).

La solución directa para evitar las marras por estrés hídrico es el riego de los brinzales que tiene como principal ventaja su total independencia de las siempre aleatorias lluvias. Se evita de esta manera el riesgo de tener que reponer marras al actuar sobre el origen mismo que las causa. Los riegos de brinzales son muy útiles para reducir las marras por estrés hídrico en zonas áridas, subdesérticas y desérticas (Baker, 1955; Murphy, 1989; Bainbridge *et al.*, 1995; Matorel, 1996; Grantz *et al.*, 1998; Bean *et al.*, 2004; Sanchez *et al.*, 2004; Squeo *et al.*, 2007) y también en otros tipos de áreas críticas como son aquellas zonas donde los trabajos de restauración para el recubrimiento de impluvios con vegetación arbórea no sea viable o presente graves defectos al emplear especies o procedimientos convencionales (Ruiz de la Torre *et al.*, 1996).

La reducción de las marras a través de tratamientos culturales es un tema de interés creciente porque se necesitan nuevas tecnologías para asegurar la supervivencia de plantas en condiciones adversas (Oliet y Jacobs, 2012), especialmente por los escenarios de cambio climático vaticinados en las tierras áridas, que prevén cómo el aumento de las condiciones de estrés hídrico afectarán negativamente a la supervivencia (Vicente-Serrano *et al.*, 2010), dificultando que las plantas alcancen su autonomía hídrica.

Hasta ahora el marco de gestión más extendido ante el fallo en repoblaciones forestales es el correctivo y consiste en la aplicación de medidas a posteriori: reposición de marras u otros cuidados culturales. Estas medidas aplicadas a posteriori acarrean costes económicos impredecibles, impiden la planificación de actuaciones y el establecimiento de una fecha de finalización de los trabajos, y generan una incertidumbre en cuanto a la garantía de éxito de la plantación. Esta forma de proceder dificulta la previsión de presupuestos y el acceso a fondos de financiación y puede conducir a sanciones administrativas en el caso de existir subvenciones. Al mismo tiempo se producen otros inconvenientes no menos importantes por el retraso en la percepción de rentas y en la consecución de los objetivos de la plantación. Además, se produce una interrupción de los servicios ambientales que puede llegar a desarticular la forma principal de masa diseñada. Todo ello genera un daño en la imagen que se transmite a la sociedad sobre la acción forestal repobladora.

1.2. Fundamentos hidráulicos del microrriego de brinzales

Por sus objetivos, los riegos de brinzales difieren mucho de los practicados en agricultura, pues no persiguen una alta producción sino el mero establecimiento de

una vegetación leñosa: árboles y/o arbustos bien adaptados al lugar que –una vez arraigados– prosperen y se desarrollen de manera autónoma, restaurando el ecosistema y/o mejorando el paisaje.

Los riegos de brinzales en zona árida deben ser *riegos localizados* (junto a cada planta o semilla) y suplementarios (aportan agua, únicamente en caso necesario, para asegurar el arraigo y el establecimiento de las plantas). Son *riegos deficitarios* (alejados de la capacidad de campo; próximos al punto de marchitez permanente) y sub-superficiales o bajo acolchado (humedecen en profundidad, o superficialmente pero bajo una capa de acolchado, para evitar la evaporación directa). Son *riegos de muy baja frecuencia* (por ejemplo: una vez al mes, una vez al año). Entregan el *agua sin necesidad de presión* (los emisores funcionan a presión nula). Son *riegos temporales* (se practican durante el primer año o durante unos pocos años, hasta que la vegetación introducida alcance su autonomía hídrica). Como requieren una dotación de agua muy escasa (generalmente inferior a $10 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$) por su aplicación localizada, por su alta eficiencia de aplicación y por los pocos puntos a irrigar por hectárea, puede hablarse de *nano-riegos* y de *mini-dosis* de aplicación.

Atendiendo al fundamento de entrega de agua de cada sistema pueden distinguirse cuatro grupos:

- a) el riego directo en profundidad (regido por la infiltración).
- b) el riego a través de paredes porosas (regido por la ley de Darcy).
- c) el riego a través de cordeles o de fieltros (regido por la capilaridad y la permeabilidad).
- d) el riego mediante destiladores solares (regido por procesos de evaporación y condensación).

Dentro de los riegos de brinzales conviene distinguir entre: *el riego de arraigo* (o de establecimiento) que es el primer riego (nada más plantar o sembrar, o al poco tiempo de realizada la implantación); *los microrriegos de apoyo* (o de mantenimiento) que se practican de manera programada para que los brinzales superen los periodos de sequía y que se prolongan hasta que la planta alcance su autonomía hídrica; y *los microrriegos de socorro* (o de supervivencia) que son excepcionales, imprevistos y de actuación urgente para salvar a los brinzales de una muerte segura ante una sequía extrema (Martínez de Azagra and Del Río, 2012).

1.3. Viabilidad económica del microrriego

Los métodos de evaluación económica ofrecen un criterio de selección entre las distintas alternativas y opciones técnicas consideradas en la plantación (Löf et al., 2012; Robins and Daniel, 2012), ya que la principal limitación para la utilización de microrriegos es su coste económico (Martínez de Azagra and Del Río, 2012; Del Río et al., 2013).

Para los microrriegos y para otras medidas de apoyo al establecimiento de plantaciones, no conocemos modelos que ayuden a responder a esta cuestión. Un planteamiento económico cercano lo encontramos en la determinación del umbral econó-

mico de plagas (Stern *et al.*, 1959; Pedigo, 1986; Bor, 1995). Por otro lado, para fijar el mejor momento de la corta existe un procedimiento económico consolidado dentro del ámbito forestal: el del turno financiero de corta mediante la solución de Faustmann-Preßler-Ohlin (Johannson and Löfgren, 1985; Díaz-Balteiro, 1997). Pero para el momento temporal opuesto, es decir, para la etapa inicial de las plantaciones se carece de un marco económico general. Aunque se han realizado evaluaciones particulares basadas en ensayos (Hobbs and Harris, 2001; Matthews *et al.*, 2009; Kettenring and Adams, 2011; Löf *et al.*, 2012; Robins and Daniel, 2012) conviene trasladar los resultados experimentales a escalas más amplias (Suding, 2011; Cortina *et al.*, 2011) para poder ofrecer dominios de recomendación (CIMMYT 1988) que orienten, en términos económicos, la selección entre las diferentes tecnologías disponibles (Rodríguez *et al.*, 2009; Cortina *et al.*, 2011).

Se plantea, por tanto, una duda central: ¿En qué situación resulta ventajoso desde el punto de vista económico pasar de la clásica reposición de marras a la utilización de microrriegos? ¿Cómo podemos obtener el valor fronterizo M , el valor total de marras para el que se iguala el balance de costes–beneficios de las dos alternativas contempladas? Para responder a esta pregunta desarrollamos un modelo que realiza una comparación económica que se basa en el principio de recuperación de costes netos del microrriego, al que hemos denominado *Mthreshold*.

2. Material y métodos

2.1. El estrés hídrico como principal causa de las marras en zona áridas

Una de las principales causas del fracaso en el arraigo y primer desarrollo de las plántulas en repoblaciones y plantaciones en climas áridos es el estrés hídrico (Burdett, 1990; Margolis and Brand, 1990; Moles and Westoby, 2004). Este factor es especialmente patente en regiones con sequía fisiológica durante el periodo vegetativo como es el caso del clima mediterráneo (Herrera, 1992).

La relación entre los distintos tipos de marras viene dada por la ecuación 1 que trabaja con el valor medio de estas dos variables (ver *tab. 1* en donde se concreta la nomenclatura utilizada) y que considera que ambas son variables aleatorias independientes entre sí. En zonas áridas y suele resultar grande en comparación con μ . Por lo que el modelo plantea como hipótesis que sólo se producen marras significativas durante el primer año de la planta en monte, siendo su principal causa el estrés hídrico.

$$MR = \Psi + \mu \quad [\text{eq. 1}]$$

2.2. Análisis coste-beneficio y estrategia de reposición de planta

MThreshold define una ecuación económica (eq. 2) para cuya resolución hay que fijar una estrategia de reposición de marras (eq. 3). La solución de este sistema de ecuaciones diofánticas nos permite obtener los valores de M y de N . Con el fin de fa-

cilitar su manejo se ha desarrollado una aplicación en VBA implementada en Excel.

$$C_{wat} \leq C_{rep} + \Delta B \quad [\text{eq. 2}]$$

$$N \geq \frac{\ln ALF}{\ln M} \quad [\text{eq. 3}]$$

Donde C_{wat} y C_{rep} quedan definidos por las ecuaciones (eq. 4) y (eq. 5) respectivamente, y ΔB es la diferencia de beneficios entre la opción de regar y la opción de reponer marras, N es el último año en el que se realiza reposición de marras, ALF es el nivel admisible de marras, y M es el umbral de marras que iguala el valor neto actualizado de costes y beneficios en ambas alternativas.

$$C_{wat} = h \cdot d \cdot \rho + \rho \cdot \sum_{j=1}^{n_{ri}} \frac{w_j \cdot NR_j}{(1+i)^{j-1}} \quad [\text{eq. 4}]$$

$$C_{rep} = \rho \cdot \sum_{j=2}^N \frac{c_j \cdot M^{j-1}}{(1+i)^{j-1}} + \sum_{j=2}^N \frac{a_j + b_j \cdot \rho \cdot M^{j-1}}{(1+i)^{j-1}} \quad [\text{eq. 5}]$$

En ΔB (eq. 6) intervienen dos conceptos. El primero es el lucro cesante, que es el beneficio que se deja de percibir de renta como consecuencia de la reposición de marras. Se retrasa la recepción de la renta en ε años en la fracción de la masa en la que hemos repuesto las marras. El segundo concepto se refiere a los beneficios adelantados: es el adelanto de ingresos en e años que se consigue como consecuencia de la aplicación del microrriego.

$$\Delta B = \sum_{j=\alpha}^{\beta} \frac{\Delta B_j}{(1+i)^{j-1}} = R \cdot \left[\sum_{j=e-\varepsilon}^{e-1} \frac{1}{(1+i)^{j-1}} + \sum_{j=e}^{e+N-2} \frac{M^j - e + 1}{(1+i)^{j-1}} \right] \quad [\text{eq. 6}]$$

El modelo plantea como hipótesis particular que al practicar los microrriegos no se producen marras por estrés hídrico.

2.3. La regla de decisión

Si el microrriego se enfoca como una técnica preventiva, cuya viabilidad debe ser prevista antes de que sucedan las marras, necesitamos tomar una decisión en la fase de proyecto. ¿Cuál debe ser esa regla?

La decisión que proponemos se basa en razonamientos económicos: si el nivel de marras esperado en la repoblación (M_r) es superior a M , la técnica del microrriego resultará seleccionada por ser más barata que la opción de reponer marras (eq. 7). En caso contrario se recomienda acudir a la técnica tradicional de reposición de marras (eq. 8), con lo que el problema planteado queda resuelto.

$$\text{si } M_r \geq M \rightarrow \text{Técnica de microrriego} \quad [\text{eq. 7}]$$

$$\text{si } M_r < M \rightarrow \text{Técnica de reposición de marras} \quad [\text{eq. 8}]$$

Tabla 1. Nomenclatura utilizada en el modelo *MThreshold*

Símbolo	Significado del símbolo
a_j	Término independiente de la ecuación lineal que determina el coste de la plantación en el año j {€/ha}. No incluye el precio de la planta.
ALF	Nivel admisible de marras {en porcentaje (%) o en tanto por uno (t.p.u.)}
b_j	Pendiente de la recta que sirve para determinar el coste de la plantación en el año j {€/planta}. No incluye el precio de la planta
c_j	Precio unitario de las plantas en el año j {€/planta}
C	Coste de la repoblación inicial (cuando coinciden en las dos alternativas consideradas) {€/ha}
C_{rep}	Costes totales de la reposición de marras {€/ha}
C_{wat}	Costes totales del microrriego {€/ha}
d	Precio unitario medio del sistema de microrriego (incluyendo costes de instalación) {€/planta}
ε	Número de años en los que se adelanta la producción por acción del riego {adim}
e	Edad de entrada en producción de rentas del monte sin riegos {año}
h	Dificultad de instalación en monte del sistema de microrriego. Por lo general: $h \in [0,75 - 1,5]$ {adim}
i	Tasa de capitalización, tasa de interés anual {en t.p.u.}
j	Subíndice que indica el número de orden del año ($j = 1$ es el año de repoblación) {adim}
M	Nivel total de marras para el que se igualan los costes de las dos alternativas contempladas: regar o no regar {t.p.u.}. Variable principal del modelo
MR_o	Nivel de marras observado en la repoblación sin aplicar microrriegos de apoyo (en t.p.u.)
M_s	Nivel de marras esperado en la repoblación sin aplicar microrriegos de apoyo {en t.p.u.} (valor medio)
n_{ri}	Número de años en los que se practican microrriegos {adim}
n_{sm}	Número de años en los que se realiza reposición (sustitución) de marras {adim}
N	Último año en el que se realiza reposición de marras {adim}, valiendo: $N = n_{sm} + 1$
NR_j	Volumen anual de agua aplicado con el microrriego a cada planta en el año j {L/planta/año}
R	Renta económica media {€/ha} de un monte restaurado a la edad de e años (incluye tanto los beneficios directos como los indirectos) {€/ha}
w_j	Coste unitario del riego (es decir: del agua aportada y de su forma de aplicación) {€/L}
α	Primer año en el que los beneficios (rentas) difieren entre las dos opciones consideradas
β	Último año en el que los beneficios (rentas) difieren entre las dos opciones consideradas
$\Delta B, \Delta B_j$	Diferencia de beneficios entre la opción de regar y la opción de reponer marras {€/ha}, (en el año j)
μ	Marras por causas distintas al estrés hídrico: herbivoría; daños abióticos; labores defectuosas, etc. {en t.p.u.} (valor medio)
ρ	Densidad inicial de repoblación, densidad objetivo {pies/ha}
ψ	Nivel de marras por estrés hídrico {t.p.u.} (valor medio)

Nota: “t.p.u.”: tanto por uno; “adim” : “sin unidades”

2.4. Los escenarios de plantación forestal

El modelo debe ser aplicado a cada proyecto concreto que se vaya a redactar, pero para obtener unos valores de referencia lo hemos aplicado a trece escenarios sin-

téticos de repoblaciones. Cada uno de ellos se caracteriza por una finalidad de la plantación que tiene un nivel admisible de fallos ALF . El coste de plantación C se obtiene según la densidad, método de preparación del terreno, especie/s y tipo de material forestal de reproducción empleados. La plantación forestal que comienza a producir en el año e una renta anual R . Para describir cuantitativamente cada caso de estudio hemos supuesto unos valores habituales de todas las variables de entrada (*tab. 2*).

Para todos los escenarios se ha considerado la aplicación del microrriego por medio de tubos verticales durante el primer año de plantación, caracterizado por $d = 0.93 \text{ €} \cdot \text{planta}^{-1}$; $w = 0.005 \text{ €} \cdot \text{L}^{-1}$; $NR = 6.4 \text{ L} \cdot \text{planta}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$; $n_i = 1 \text{ año}$ (Sánchez *et al.*, 2004; Del Río *et al.*, 2013).

Hemos elegido el sistema de microrriego más barato para analizar el caso más competitivo. El tipo de interés lo fijamos en el 4%, valor normativo utilizado en la financiación pública de proyectos, y en el 10% para describir la financiación privada. Para todos los escenarios considerados el valor de $\mu = 0.02 \text{ t.p.u.}$; y el de $\varepsilon = 2 \text{ años}$, (Del Río *et al.*, 2013).

Con los datos de la *tabla 2* hallamos en primer lugar los valores de M y N utilizando el modelo *MThreshold*. A continuación realizamos una clasificación no supervisada de los escenarios para identificar diferentes grupos según su aptitud para el microrriego. Esta clasificación se realiza con el procedimiento estadístico de análisis de conglomerados de las K-medias a partir de los valores de M y ALF de cada escenario usando medias actualizadas. El número de clases se ha definido con la regla de *elbow* (Tibshirani *et al.*, 2001). El análisis se ha realizado con el paquete estadístico SPSS.

3. Resultados

Se detectan cuatro grupos de aptitud para el microrriego, diferenciados por color en la *figura 1*. En la gráfica mostramos en abscisas el coste de la plantación y en ordenadas la renta anual, representada en escala logarítmica. El coste indica el esfuerzo selvicultor invertido en la plantación (desde el material forestal de reproducción empleado hasta la técnica de preparación del terreno), y la renta anual es una aproximación a la relevancia económica y social de la repoblación (Maseiro *et al.*, 2015) ya que tiene en cuenta tanto los beneficios directos como los indirectos.

El *Grupo I* (círculos muy pequeños de color rojo) está formado por escenarios de elevada renta que tienen niveles admisibles de marras (ALF) muy restrictivos, y para los que existe un amplio abanico de costes de implantación posibles. Se corresponde con plantaciones de protección de infraestructuras viarias, ferroviarias, hidráulicas, fruticultura y truficultura. En ellas el uso del microrriego resulta económicamente ventajoso a partir de un 3% de marras.

El *Grupo II* (círculos de color verde) son plantaciones muy costosas, con niveles admisibles de marras más elevados que en el caso anterior. El microrriego es recomendable a partir de umbrales de marras del 14% al 24% en xerojardinería, cortavientos y en la obtención de productos forestales no maderables de alto valor.

Tabla 2. Datos de entrada para los escenarios sintéticos de plantación (Nomenclatura en tabla 1) y resultados obtenidos con *MThreshold* (columnas de *M* y de *N*)

Escenario	$a^{(1)}$	$b^{(1)}$	$c^{(1)}$	$\rho^{(1)}$	$ALF^{(1)}$	i	$R^{(1)}$	$e^{(1)}$	$C^{(2)}$	M	N
Protección de infraestructuras ferroviarias	90	1.75	0.62	400	0.03	0.10	12000	5	1038.00	0.030 ⁽³⁾	1
Protección de infraestructuras viarias	90	1.75	0.30	400	0.03	0.10	4700	5	910.00	0.030 ⁽³⁾	1
Truficultura	60	0.53	6.00	400	0.03	0.10	5000	21	2672.00	0.030 ⁽³⁾	1
Protección de infraestructuras hidráulicas	90	1.75	0.30	1600	0.03	0.04	2823	21	3370.00	0.030 ⁽³⁾	1
Fruticultura	60	0.53	1.00	2315	0.03	0.04	5000	11	3601.95	0.030 ⁽³⁾	1
Xerojardinería	80	1.3	0.62	1100	0.03	0.04	1500	41	2192.00	0.1369	2
Productos forestales no maderables (hongos)	80	1.30	0.62	1600	0.03	0.04	650	21	3152.00	0.196	3
Barrera cortavientos	20	0.63	1.00	2500	0.03	0.04	1100	21	4095.00	0.2395	3
Productora madera comercial	60	0.53	0.49	1600	0.30	0.04	2500	41	1692.00	0.300 ⁽³⁾	1
Plantación en área crítica	90	1.75	0.30	800	0.30	0.04	135	21	1730.00	0.337	2
Plantación multifuncional	80	1.30	0.30	1100	0.30	0.04	287	21	1840.00	0.386	2
Forestación de tierras agrícolas	60	0.53	0.41	800	0.30	0.04	287	21	812.00	0.508	2
Plantación protectora	60	0.53	0.30	800	0.30	0.04	60	61	724.00	0.625	3

Fuentes de los datos:

⁽¹⁾ a, b, c, ρ, ALF, R, e : (García *et al.*, 1993; Salado and Astals, 2010; Fernández and Vázquez, 2012; Ministerio de Fomento, 2014; Morcillo *et al.*, 2015; Catalina and Vicente, 2001; Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 2011; Socias and Couceiro, 2014; Díaz-Balteiro *et al.*, 2013; Peri and Pastur, 1998; Peri and Bloomberg, 2002; Consejería de Medio Ambiente, 2005).

⁽²⁾ $C = a + (b + c) \cdot \rho$ {€·ha⁻¹}

⁽³⁾ El umbral de marras (M) no puede resultar menor que la tolerancia (ALF). En estos casos se satisface el nivel de tolerancia sin necesidad de reponer marras. N vale 1.

Figura 1. Clasificación de la aptitud para el microrriego de los escenarios de plantación. El área de los círculos representa el umbral M cuyo valor aparece en la etiqueta de cada círculo. El color de cada círculo es el grupo al que pertenece cada escenario de plantación. Rojo: *Grupo I*. Verde: *Grupo II*. Naranja: *Grupo III*. Azul: *Grupo IV*. En la etiqueta se incluye el nombre del escenario, el valor de M y el valor de N , separados por un punto y coma.

El *Grupo III* (círculos naranjas) incluye a los escenarios con costes y renta medios que tienen un nivel admisible de marras amplio. Es el grupo de las plantaciones productoras de madera, multifuncionales, y protectoras realizadas con microcuencas. Los umbrales de marras para la aplicación del microrriego están comprendidos en el rango del 30 al 39%. Este valor es próximo a la tolerancia habitual aceptada para reponer marras, lo que explica que hasta la fecha no se hayan popularizado las técnicas de microrriego en tales casos.

El *Grupo IV* (círculos azules) contiene a los escenarios baratos de implantar, con escasa renta y con niveles admisibles de marras elevados. Esta es la situación habitual de plantaciones protectoras (subsolado) con baja calidad de estación y de plantaciones habituales del programa de forestación de tierras agrarias. Los umbrales de marras obtenidos para la aplicación del microrriego son los más altos y se sitúan entre el 51 al 61%. Esta cifra restringe su uso a áreas críticas con una previsible mortandad muy alta por estrés hídrico.

4. Discusión

En el modelo que proponemos las marras se contemplan desde otra perspectiva

(tab 3): como un parámetro de diseño que debe ser tenido en cuenta en las fases iniciales del proyecto, antes de abordar la restauración. Este planteamiento pretende integrar los cuidados culturales como herramienta de una gestión preventiva del riesgo para emprender restauraciones exitosas en zona árida.

Tabla 3. Modelos de gestión de las marras

Modelo de Gestión	Momento de aplicación	Indicador	Marras	Regla de decisión (cuando se aplica el cuidado cultural)	Tipo de medida	Técnica
Actual: Correctiva	A posteriori	Estándar técnico Control de calidad	Observadas	$MR_o > ALF$	Corrección	Reposición de marras
					Correctiva	Microrriego de socorro
Propuesta: Preventiva	A priori	Parámetro de diseño	Esperadas	$M_R > M$	Preventiva	Microrriego de implantación Microrriego de apoyo
					Correctiva	Microrriego de socorro

MThreshold utiliza exclusivamente un criterio económico que tiene la ventaja de reducir a unidades monetarias múltiples aspectos relacionados con la silvicultura o la relevancia de las plantaciones. Pero el sistema preventivo descrito también pueden aplicarse a otros criterios de decisión distintos (adicionales, complementarios o antagónicos al criterio económico) para decantarse en favor de una u otra opción. Algunos ejemplos en este sentido pueden ser los siguientes: criterios selvícolas (forma principal de masa preferente); criterios ecológicos (posibilidad de biodegradación o reciclado de los materiales, incidencia en la fauna, biodiversidad); criterios socioeconómicos (trabajo, mano de obra, maquinaria, fomento del I+D+i, riesgo de robo o vandalismo en zonas periurbanas); paisajísticos (mayor o menor visibilidad del sistema de microrriego), criterios políticos (inauguración en tiempo); criterio técnico (garantía en la consecución de objetivos) o criterio de fondo de inversión (plazo para recuperación de la inversión), entre otros.

La utilización de sistemas de microrriego más costosos que el considerado en estos ejemplos de referencia conducen a umbrales M mayores, lo que apunta hacia la existencia de un límite superior de precio para poder comercializar estos cuidados culturales en función del escenario de plantación. Este límite marca el precio que puede ser asumido por el mercado para que el microrriego sea competitivo frente a la reposición de marras. Además, conviene desarrollar el marco teórico para conocer el valor de M_R y determinar el valor de ALF más apropiado en cada tipo de plantación.

5. Conclusiones

- El modelo *MThreshold* permite comparar dos alternativas de plantación entre sí (con o sin riego) obteniendo el valor umbral M que las iguala desde el punto de vista económico.
- El modelo *MThreshold* permite evaluar la viabilidad económica del microrriego de brinzales y acometer una gestión preventiva del riesgo de marras por estrés hídrico en las plantaciones que supera su actual concepción como estándar técnico.
- Los microrriegos resultan muy competitivos en situaciones de repoblación en las que el valor del umbral de marras M resulte bajo. Estas circunstancias concurren en plantaciones con una tolerancia de marras exigente (valores de ALF bajos) que vayan a tener una elevada renta anual R , en las que las plantas de repoblación tengan un precio elevado y si la preparación del terreno resulta costosa.
- Por el contrario y de acuerdo con los resultados obtenidos con *MThreshold*, el uso del microrriego queda restringido a áreas críticas por estrés hídrico (zonas recalcitrantes) en las repoblaciones forestales clásicas realizadas con densidades elevadas de plantación, mediante una ejecución sencilla, por un coste módico y con una tolerancia de marras elevada (ALF altos).
- Un aumento de los tipos de interés o del precio unitario d del sistema de microrriego elegido también reduce su campo de aplicación, al aumentar el umbral de marras M .
- La clasificación propuesta para los escenarios de plantación, basada en el modelo *MThreshold* y en ALF , permite describir la aptitud de cada grupo para el microrriego de brinzales.
- El modelo *MThreshold* puede ser aplicado a otros cuidados culturales (uso de protectores, escardas, acolchados, etc.) cuyo efecto redunde en una disminución de las marras o en un aumento de beneficios.

6. Agradecimientos

Al profesor Pablo Martínez Zurimendi por haber presentado esta metodología en la III Reunión conjunta de los Grupos de Trabajo de Repoblaciones Forestales de la SECF y de Restauración Ecológica de la AEET. Así mismo, agradecerle su valiosa sugerencia de relacionar este modelo con el umbral de daños en plagas.

6. Bibliografía

- Bainbridge, D. A., Fidelibus, M., Macaller, R., 1995. Techniques for plant establishment in arid ecosystems. *Restoration and Management Notes*. 13, 190-197.
- Baker, F. S., 1955. California's forest regeneration problems, Ed. Department of Natural Resources. Division of Forestry. State Board of Forestry, Regeneration Committee. Sacramento. California.

- Bean, T. M., Smith, S.E., Karpiscak, M.M., 2004. Intensive revegetation in Arizona's Hot Desert: The Advantages of Container Stock. *Native Plants Journal*. 2, 173-180.
- Bor, Y.J., 1995. Optimal pest management and economic threshold. *Agricultural Systems*. 49 (2), 113-133.
- Burdett, A.N., 1990. Physiological processes in plantation establishment and the development of specification for forest planting stock. *Canadian Journal of Forest Research*. 4, 415-427.
- Catalina, M.A., Vicente, C., 2001. Rentabilidad y sostenibilidad de las acciones de corrección hidrológico-forestales. In: Andalucía SECF-Jd (ed) III Congreso Forestal Español. Montes para la Sociedad del Nuevo Milenio Gráficas Coria., Sevilla. España.
- Consejería de Medio Ambiente, 2005. Castilla y León crece con el bosque. Junta de Castilla y León, Valladolid. Spain.
- Cortina, J., Amat, B., Castillo, V., Fuentes, D., Maestre, F.T., Padilla, F.M., Rojo, L., 2011. The restoration of vegetation cover in the semi-arid Iberian southeast. *Journal of Arid Environments*. 75 (12), 1377-1384.
- CIMMYT., 1988. La formulación de recomendaciones a partir de datos agronómicos: Un manual metodológico de evaluación económica. CIMMYT, Mexico D.F, Mexico.
- Del Río, J., Gómez, E., Reque, J., Martínez De Azagra, A., 2013. Reponer marras o regar brinzales: una disyuntiva a analizar en zona árida. In *Avances en la restauración de sistemas forestales. Técnicas de implantación* (C. Martínez-Ruiz, F. J. Lario Leza y B. Fernández-Santos, eds.). Palencia, España, SECF y AEET. pp 13-18.
- Díaz-Balteiro, L., 1997. Turno forestal económicamente óptimo: una revisión. *Revista española de economía agraria*. 180, 181-224.
- Díaz-Balteiro, L., Alfranca, O., Voces, R., 2013. Mercado de *Lactarius deliciosus*. Modelización de la oferta en España. *Información técnica económica agraria*. 109 (3):370-398.
- Fernández, F.J., Vázquez, J., 2012. Costes de las líneas de alta velocidad internalizados en la contabilidad del administrador de infraestructuras. *Revista de alta velocidad*. 360 (2):5-22.
- García, J.I., Carreras, C., Orti, M., 1993 Instalación de cubierta vegetal en taludes de obras en zonas áridas. *Informes de la Construcción*. 45 (425-426):85-93.
- Grantz, D.A., Vaughn, D.L., Farber, R.J., Kim, B., Ashbaugh, L., Vancuren, T., Campbell, R., Bainbridge, D., Zink, T., 1998. Transplanting native plants to revegetate abandoned farmland in the western Mojave Desert. *Journal of Environmental Quality*. 27(4), 960-967.
- Herrera, C. M., 1992. Historical effects and sorting processes as explanations for contemporary ecological patterns: character syndromes in Mediterranean woody plants. *American naturalist*. 140(3), 421-446.
- Hobbs, R.J., Harris, J.A., 2001. Restoration ecology: repairing the earth's ecosystems in the new millennium. *Restoration Ecology*. 9 (2), 239-246.
- Jiménez, M.N., Fernández_Ondoño, E., Ripoll, M.Á., Castro_Rodríguez, J., Huntsinger, L., Navarro, F.B., 2013. Stones and organic mulches improve the *Quercus ilex* L. afforestation success under Mediterranean climatic conditions. *Land Degradation & Development*. 27(2), 357-365.
- Johansson, P.O., Löfgren.K.G., 1985. The economics of forestry and natural resources. Basil Blackwell, Oxford, UK and New York.
- Kettenring, K.M., Adams, C.R., 2011. Lessons learned from invasive plant control experiments: a systematic review and meta-analysis. *Journal of Applied Ecology*. 48 (4), 970-979.

- Löf, M., Dey, D.C., Navarro, R.M., Jacobs, D.F., 2012. Mechanical site preparation for forest restoration. *New Forests*. 5-6, 825-848.
- Margolis, H., Brand, D., 1990. An ecophysiological basis for understanding plantation establishment. *Canadian Journal of Forest Research*. 4, 375-390.
- Martínez De Azagra, A., Del Río, J., 2012. Los riegos de apoyo y de socorro en repoblaciones forestales. *Foresta*. 54, 32-44.
- Martínez De Azagra, A., Mongil, J., Del Río, J., Rojo, L., 2006. Conceptos, modelos y ejemplos sobre oasisificación. *Ecología*. 20, 453-470.
- Masiero, M., Secco, L., Pettenella, D., Brotto, L., 2015. Standards and guidelines for forest plantation management: A global comparative study. *Forest Policy and Economics*. 53, 29-44.
- Matthews, J.W., Spyreas, G., Endress, A.G., 2009. Trajectories of vegetation-based indicators used to assess wetland restoration progress. *Ecological Applications* 19 (8), 2093-2107.
- Matorel, M., 1996. Programa piloto de reforestación extensiva. Documento inédito. Universidad de Piura (Perú).
- Mattoon, A., 1998. Tree plantations taking root. *Vital Signs, WorldWatch Institute, New York*. 126-127.
- Ministerio de Fomento, 2014. Mapa de tráfico 2014. Madrid, Spain.
- Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 2011. Resumen provincial del valor económico y la renta anual de la superficie forestal arbolada según la metodología del IFN3. Tablas. Resumen Nacional del Tercer Inventario Forestal Nacional. Valoración económica, Definitiva edn. Dirección General de Medio Natural y Política Forestal, Madrid. Spain.
- Morcillo, M., Sanchez, M., Vilanova, X., 2015. Cultivar trufas una realidad en expansión. *Micología Forestal Aplicada SL, Spain*.
- Moles, A.T., Westoby, M., 2004. Seedling survival and seed size: a synthesis of the literature. *Journal of Ecology*. 3, 372-383.
- Murphy, T., 1989. Planting in extreme climates. *Journal of Arid Lands Permaculture*. 1, 6-7.
- Oliet, J.A., Jacobs, D.F., 2012. Restoring forests: advances in techniques and theory. *New Forests*. 43(5), 535-541.
- Pedigo, L.P., Hutchins, S.H., Higley, L.G., 1986. Economic injury levels in theory and practice. *Annual review of entomology*. 31 (1): 341-368.
- Peri, P., Pastur, G.M., 1998. Crecimiento en cortinas cortavientos de "Populus nigra cv. Itálica" en Patagonia Sur (Argentina). *Investigación agraria Sistemas y recursos forestales*. 7(1):73-84.
- Peri, P., Bloomberg, M., 2002. Windbreaks in southern Patagonia, Argentina: A review of research on growth models, windspeed reduction, and effects on crops. *Agroforestry Systems*. 56 (2):129-144.
- Reque, J., Bravo, F., 1993. Experiencias en repoblaciones con placas de mulch en la comarca del cerrato palentino; resultados preliminares. In *Actas del Congreso Forestal Español-Lourizán 93.*, vol. A (F. Silva-Pando y G. Alonso eds.), 427-431. SECF, Grapol, Vigo, España.
- Rodrigues, R.R., Lima, R.A.F., Gandolfi, S., Nave, A.G., 2009. On the restoration of high diversity forests: 30 years of experience in the Brazilian Atlantic Forest. *Biological Conservation*. 142 (6), 1242-1251.

- Robbins, A.S.T., Daniels, J.M., 2012. Restoration and Economics: A Union Waiting to Happen? *Restoration Ecology*. 1, 10-17.
- Ruiz De La Torre, J., Carreras Egaña, C., García Viñas, J.I., Orti Moris, M., 1996. Manual de la flora para la restauración de áreas críticas y diversificación en masas forestales, Ed. Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía. Sevilla, España.
- Salado, F., Astals, F., 2010. Estudio de los costes totales, incluyendo las externalidades, del AVE: Aplicación al caso Barcelona-Madrid y comparación con otros modos de transporte. Universitat Politècnica de Catalunya, Terrasa.
- Sánchez, J., Ortega, R., Hervás, M., Padilla, F., Pugnaire, F., 2004. El microrriego, una técnica de restauración de la cubierta vegetal para ambientes semiáridos. *Cuadernos de la SECF*. 109-112.
- Serrada, R., Navarro, R., Pemán, J., 2005. La calidad de las repoblaciones forestales: una aproximación desde la silvicultura y la ecofisiología. *Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales*. 3, 462-481.
- Socias, R., Couceiro, J.F., 2014. Frutos secos. Almendro y pistachero in: Hueso, J.J., Cuevas, J. (eds) La fruticultura del siglo XXI en España. Cajamar Caja Rural.
- Squeo, F. A., Jiménez, M., Albán, L., Reyes, J., Gutiérrez, J., Holmgren, M., 2007. Tree establishment along an ENSO experimental gradient in the Atacama desert. *Journal of Vegetation Sciences*. 18(2), 195-202.
- Stern, V.M., Smith, R.F., Van den Bosch, R., Hagen, K.S., 1959. The integration of chemical and biological control of the spotted alfalfa aphid. The integrated control concept. *Hilgardia*. 29 (2), 81-101.
- Suding, K.N., 2011. Toward an era of restoration in ecology: successes and failures along the science-practice divide. *Ann Rev Ecol Evol Syst* 42, 465-487.
- Tibshirani, R., Walther, G., Hastie, T., 2001. Estimating the number of clusters in a data set via the gap statistic. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Statistical Methodology)*. 63(2), 411-423.
- Vallejo, V.R., Allen, E.B., Aronson, J., Pausas, J.G., Cortina, J., Gutierrez, J.R., 2012. Restoration of Mediterranean-Type Woodlands and Shrublands. In *Restoration Ecology*, John Wiley & Sons, Ltd, 130-144.
- Vicente-Serrano, S.M., Lasanta, T., Gracia, C., 2010. Aridification determines changes in forest growth in *Pinus halepensis* forests under semiarid Mediterranean climate conditions. *Agricultural and Forest Meteorology*. 4, 614-628.