UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PALERMO
Dottorato di Ricerca in Scienze Agrarie, Forestali ed Ambientali (SAFA)
Dipartimento di Scienze Agrarie, Alimentari e Forestali (SAAF)
Indirizzo – Tutela del Territorio e Valorizzazione delle Produzioni Agro-alimentari
Settore Scientifico Disciplinare – AGR/08

REUTILIZACIÓN DE RESIDUOS DE PODA DE VID Y DE *POSIDONIA OCEANICA* EN LAS OBRAS DE BIOINGENIERÍA DEL PAISAJE

IL DOTTORE
DOTT.SSA ROBERTA CALVO

IL COORDINATORE
CHIAR.MO PROF. VINCENZO BAGARELLO

IL TUTOR
CHIAR.MO PROF. FRANCESCO D'ASARO

IL CO TUTOR
CHIAR.MO PROF. LUCIANO GRISTINA

CICLO XXX
2018

Índice de contenido

Riassunto **1**

Long Abstract **6**

Introducción **10**

Bioingeniería del Paisaje **13**

La fajinas en las obras de Bioingeniería del Paisaje **15**

Objetivo de la investigación **16**

La economía circular **18**

Neomateriales **21**

Residuos de poda de vid **24**

Residuos de *Posidonia oceanica* **25**

Usos de los residuos de *Posidonia oceanica* 27

Normativa de referencia 28

Métodos **30**

Residuos de poda de vid **30**

Área de muestreo 30

Instrumentación 32

Características medias de sarmientos y fajinas 33

Ensayos de resistencia mecánica 33

Residuos de *Posidonia oceanica* **36**

Área de muestreo 36

Instrumentación 37

Medidas de salinidad 39

Medidas de densidad 40

Caracterización hidrológica de los residuos de *Posidonia oceanica* 40

Material vegetal **43**

Áreas de muestreo 43

Protocolo para la extracción de especies vegetales 47

Instrumentación 49

Medidas morfométricas del sistema aéreo y radical de las plantas 49

Ensayos mecánicos sobre la tensión de rotura de las raíces 50

Instalación de fajinas experimentales **52**

Medición de Temperatura 55

Resultados **56**
Sarmientos y características de las fajinas **56**
Calidad mecánica de las muestras de sarmientos 56
Residuos de *Posidonia oceanica* **60**
Medidas de salinidad 60
Proceso de infiltración 61
Material Vegetal **66**
Medidas morfométricas del sistema aéreo y radical de las plantas 66
Características biotécnicas 71
Instalación de fajinas experimentales **79**
Temperatura 79
Arraigamiento y crecimiento de *Spartium junceum* 82
Discusión **83**
Evolución mecanizada y patentada de la fajina **88**
Conclusiones **93**
Bibliografía **96**

Riassunto

La popolazione mondiale è in continua espansione e la crescita demografica ed economica inducono allo sfruttamento progressivo dell'ambiente ed al depauperamento delle risorse naturali (acqua ed energia in particolare), con conseguenti impatti potenzialmente importanti sul cambiamento globale.

Si rende, pertanto, necessaria ed urgente una più efficiente gestione delle risorse basata sulla rielaborazione di obiettivi sostenibili di politiche e strategie ambientali e sulla riduzione del consumo delle risorse, promuovendo la transizione da un modello di economia lineare ad uno circolare, costituito da un ciclo continuo di sviluppo positivo che preserva e migliora il capitale naturale, ottimizzando l'utilizzo delle risorse a tutte le scale.

Come noto, l'Ingegneria Naturalistica (IN) utilizza le piante come materiale da costruzione nelle opere per la riqualificazione ambientale e paesaggistica del territorio. Le opere di IN sono infatti a basso impatto ambientale ed in grado di innescare processi di rinaturalizzazione che favoriscono la biodiversità, offrendo una promettente strategia di mitigazione e adattamento ai cambiamenti climatici.

Fondamentale per il raggiungimento di questi obiettivi, risulta essere quindi l'uso di materiali adeguati, sostenibili, di facile reperimento e basso costo.

Tenuto conto della grande disponibilità dei residui derivanti dalla potatura annuale delle viti (sarmenti) e dallo spiaggiamento annuale delle foglie di *Posidonia oceanica (banquette*) in Sicilia, la presente tesi ha come obiettivo principale la descrizione e l'analisi di questi nuovi materiali organici di scarto in relazione alla possibilità di uso degli stessi in opere di Ingegneria Naturalistica.

Ogni anno infatti la potatura dei vigneti produce un elevato quantitativo di residui (sarmenti), che rappresentano una biomassa da smaltire; nel contempo, il fenomeno dello spiaggiamento dei residui di *P. oceanica* è percepito come un disagio dai cittadini, entrando in conflitto con alcune attività economiche (turismo, stabilimenti balneari, ecc). Nonostante il fondamentale ruolo ecologico che rivestono le fanerogame marine sia per limitare l'erosione della costa che per favorire la formazione del sistema dunale costiero, la presenza di residui di *P. oceanica* lungo la costa può comportare la riduzione del valore turistico delle spiagge; conseguentemente è richiesta alle amministrazioni locali la rimozione delle *banquette* ed il loro conferimento in discarica.

L'utilizzo della biomassa prodotta comporta quindi un duplice vantaggio: la risoluzione del problema dello smaltimento dei residui prodotti e la creazione di nuovi prodotti, locali ed a basso costo, riutilizzabili anche nel campo del risanamento ambientale. La biomassa residuale viene vista in questo modo come una risorsa e non più un rifiuto, acquisendo un valore sia dal punto di vista ecologico che dal punto di vista economico

Nell'ottica dell'economia circolare, i sarmenti sono stati assemblati in forma di fascina per costituire l'elemento base per realizzare il modulo di una fascinata, opera lineare di IN con funzioni antierosive, consolidanti e di stabilizzazione, mentre, i residui di *P. oceanica* sono stati utilizzati come substrato di coltivazione per rendere "viva" l'opera dopo la messa a dimora di specie autoctone al suo interno.

Nella tesi sono state eseguite una serie di analisi e sperimentazioni volte:

i) a caratterizzare i due materiali per valutarne l'idoneità come costituenti della fascina,

ii) ad individuare le specie vegetali biotecnicamente più idonee a rendere viva l'opera,

iii) ad eseguire una prima valutazione sulla funzionalità dell'opera nel suo insieme utilizzando osservazioni fatte su un piccolo prototipo di fascinata messa in opera nei campi sperimentali dell'Università di Palermo.

Viene infine presentata una tecnica costruttiva innovativa delle fascinate oggetto di brevettazione da parte dell'Università degli Studi di Palermo e sviluppata nel corso delle attività di questo dottorato di ricerca.

Con l'obiettivo di stimare indicatori di resistenza e durabilità delle fascine sperimentali sono state, in primo luogo, individuate quattro aziende vitivinicole che operano nel territorio siciliano, disponibili a fornire a titolo gratuito i sarmenti appena potati.

Le prove meccaniche di resistenza a flessione (valutazione di tensioni di rottura e modulo di elasticità) sono state quindi eseguite su 122 provini di 8 differenti cultivar di sarmento (Cabernet, Inzolia, Nero d'Avola, Grecanico, Grillo, Chardonnay, Sirah e Catarratto). I provini di sarmento, di lunghezza L=10 cm ed umidità "normale" (12%), sono stati selezionati con criterio di assenza di nodi ed imperfezioni, uniformità di diametro ed asse longitudinale rettilineo (cilindricità). Sotto l'ipotesi di validità della legge di Hook, le prove di resistenza a flessione eseguite secondo lo schema a tre punti (3 point bending test) sino alla rottura delle fibre inferiori dei provini, hanno permesso di ricavare il modulo di elasticità longitudinale (lungo le fibre), E, e la tensione di rottura σ, sulla base dei diagrammi sforzo/deformazione (F/δ) e della forza a rottura, F_{max}.

Dai primi risultati si rileva come i vitigni Cabernet, Grillo e Sirah presentino le migliori caratteristiche di resistenza flessionale (maggiore rigidità) con netta prevalenza del Sirah (4878.6 MPa), mentre più deformabili risultano essere i sarmenti di Grecanico, Chardonnay, Catarratto e Nero d'Avola (1200 - 2000 MPa). I valori maggiori di tensioni di rottura si riscontrano invece per il Cabernet (70 MPa). Nel complesso, mettendo in relazione le tensioni di rottura campionarie ai corrispondenti moduli di elasticità, le migliori caratteristiche di resistenza e di maggiore durabilità riscontrate sono quelle del Cabernet e dello Chardonnay, che possono quindi trovare potenziale impiego come materiale da costruzione nelle opere di Ingegneria Naturalistica.

Pertanto, i sarmenti di Cabernet sono stati utilizzati per il confezionamento delle fascine nell'installazione sperimentale, insieme al Catarratto che è la cultivar maggiormente coltivata nella regione e che, conseguentemente, produce il maggior quantitativo di biomassa annuale.

L'area di prelievo dei residui di *P. oceanica* è stata individuata nella costa prospicente l'abitato di Custonaci in provincia di Trapani. La *banquette* dalla quale sono stati prelevati i residui presenta un'altezza di 4 m e si estende per centinaia di metri lungo la costa rocciosa alle spalle di Monte Cofano. I residui di *P. oceanica* spiaggiata sono stati rimossi meccanicamente e depositati in un'area di stoccaggio appositamente realizzata nel vicino Parco Sub urbano di Custonaci.

Allo scopo di valutare l'abbattimento della salinità a mezzo dilavamento naturale è stato studiato il processo di infiltrazione che si attua nei residui di *P. oceanica* accumulata nei siti di stoccaggio. Un contributo alla caratterizzazione idrologica dei residui di *P. oceanica* è stato fornito eseguendo una sperimentazione su campioni di residui sottoposti ad una pioggia di fissata intensità, al fine di mettere a punto un modello semplificato di infiltrazione, valido per ammassi porosi altamente permeabili. Più precisamente il modello di infiltrazione a base fisica adottato stima il tempo di ritardo, t_d (o di primo gocciolamento) ovvero il tempo necessario affinchè il fronte di umidità, a partire dall'inizio dell'evento piovoso, raggiunga la base dell'ammasso.

Il protocollo di sperimentazione è stato studiato in modo da variare progressivamente le condizioni iniziali di umidità sullo stesso campione così da non alterare le caratteristiche fisiche del campione stesso rendendo omogenei i risultati. I campioni di residui di *P. oceanica*, preparati in laboratorio con una densità apparente, pari a quella misurata su campioni indisturbati nel sito di stoccaggio, sono stati posti in anelli metallici di diametro, D = 200 mm liberamente drenanti al fondo, chiusi con tessuto non tessuto e rete metallica di contenimento. Le prove di infiltrazione sono state condotte con un simulatore di pioggia di diametro pari a quello degli anelli, alimentato con una bottiglia di Mariotte (pressione costante).

Nella sequenza delle prove le condizioni iniziali di umidità Θ_O sono variate da 0.030 a 0.197, mentre il volume drenato, $\Theta_{O,VD}$ si è incrementato da 0.030 a 0.32. La condizione iniziale di umidità ha influenzato i tempi di ritardo che sono passati dai 3.87 minuti della prima prova ai 13.62 minuti dell'ultima prova. La densità apparente ρ_β, stimata empiricamente in funzione dell'altezza H del campione, ha mostrato una variazione, da 0.130 a 0.140 g/cm^3 che ha comportato una riduzione della porosità, θ_O. Dalle prove eseguite è emerso come la compattazione dei residui di Posidonia abbia giocato un ruolo determinante durante il processo di infiltrazione. Sulla base di questa osservazione il modello teorico di infiltrazione $t_d(\Theta_o)$ adottato, valido su mezzi altamente porosi ma a porosità costante, è stato modificato introducendo sia l'effetto della compattazione che quello della parzializzazione della superficie effettivamente interessata dal processo di infiltrazione. La legge di infiltrazione tarata sui dati sperimentali per valori dell'intensità di pioggia variabili da i=20 a i=100 mm/h, per un ammasso di *P. oceanica,* messa a confronto con l'analoga legge di infiltrazione relativa ad un terreno con stesse caratteristiche idrologiche della *P. oceanica*, ha evidenziato in definitiva la differenza di comportamento dei due media. I residui di *P. oceanica* mostrano rispetto al terreno, tempi di ritardo molto brevi (infiltrazione veloce), poco variabili sia con l'intensità che con le condizioni iniziali di umidità. Per condizioni di umidità iniziale superiori a 0.15 i tempi di ritardo per il campione dei residui di *P. oceanica* tendono a crescere all'aumentare dell'umidità indicando, in questo campo, una lieve riduzione della permeabilità del mezzo, assumendo, in corrispondenza di Θ_O =0,25 valori dei tempi di ritardo prossimi a quelli del terreno.

L'abbattimento della salinità nei residui di *P. oceanica* è stato valutato in laboratorio simulando in un campione un processo di lavaggio a pressione costante. I campioni di residui di *P. oceanica* appena spiaggiati mostrano un elevato valore di conducibilità elettrica (CE) iniziale nell'acqua di drenaggio (≅ 20 mS/cm) ed un rapido abbattimento del contenuto in sali già con i primi tre lavaggi unitari (di peso pari al peso del materiale dilavato). Gli ulteriori sei lavaggi hanno affinato la riduzione di CE fino al raggiungimento di valori accettabili all'utilizzo agricolo (< 2 mS/cm). Assunta una densità della *P. oceanica* pari a 0,1 g/cm^3 un lavaggio unitario di un ammasso alto un metro corrisponde allora ad un volume d'acqua specifico di 100 mm.

I valori estremi del processo di lavaggio dei residui appena spiaggiati sono stati confermati da analisi di salinità svolte secondo metodo standard con diluizione 1:20.

L'abbattimento del contenuto salino dei residui di *P. oceanica* accumulati nel deposito all'aperto di Custonaci è avvenuto, in modo sostenibile, a mezzo di un dilavamento naturale durato poco più di un anno che ha ridotto il valore di CE a 2,8 mS/cm. Tale riduzione concorda con le sperimentazioni fatte, infatti, tenuto conto che la precipitazione media annua alla stazione pluviografica di S. Vito Lo Capo vale 474 mm e che lo spessore medio dell'ammasso è di 1 m, il deposito è stato soggetto a circa 6 lavaggi unitari che sono bastati per abbattere significativamente il valore di CE. Ulteriori lavaggi unitari applicati ad un campione di *P. oceanica* prelevato dal deposito hanno portato ad un CE pari a 1,8 mS/cm, dopo il primo lavaggio, che si è ridotto ulteriormente del 33,3% (CE=1,2 mS/cm) al terzo lavaggio unitario.

L'individuazione delle specie vegetali biotecnicamente più idonee a rendere viva l'opera è stata condotta a mezzo di prove di resistenza a trazione, Tr, delle radici. Il prelievo delle specie vegetali autoctone da utilizzare per rendere vive le fascine è stato eseguito in 5 differenti stazioni nella provincia di Palermo.

Gli elevati valori di tensioni di rottura delle radici delle specie vegetali prese in esame nello studio (*A. mauritanicus, O. miliaceum, H. coronarium. M. lupulina, L. spartum, B. distachyon, R. officinalis, R. coriaria* e *S. junceum*) confermano la loro adeguatezza nel campo del ripristino ambientale, della stabilizzazione dei versanti e nella prevenzione delle frane. In particolare *S. junceum* ha mostrato le migliori

caratteristiche biotecniche in termini di legge tensioni/diametri e quindi è stato individuato come materiale da utilizzare preferibilmente per rendere vive le fascine.

Da un'analisi più approfondita delle radici di *S. junceum* che crescono nelle due differenti giaciture di piano e di pendenza (22°- 28°- 40°), è stato possibile evidenziare come la giacitura in pendenza influenzi significativamente sia l'architettura complessiva del sistema radicale che lo stato tensionale dello stesso. L'indagine è stata eseguita in tre siti di prelievo (A, B e C) tutti in provincia di Palermo

Nelle prove di trazione effettuate, in accordo con il maggiore sviluppo e la differente architettura radicale, i campioni di *S. junceum* prelevati in giacitura di pendenza hanno presentato i valori di tensione a rottura mediamente più alti. In corrispondenza dei diametri più bassi (0,5 mm) i valori di tensione a rottura sono risultati molto simili (61-70 MPa) nelle due giaciture mentre in corrispondenza dei diametri maggiori (>1 mm) la tensione a rottura dei campioni in piano risulta minore rispetto ai campioni in pendenza. Il test di covarianza (ANCOVA) applicato al campione delle tensioni di rottura con covariata il Diametro e variabili indipendenti il sito (A, B, C) e la giacitura (piano, pendenza) ha permesso di considerare non significativa la differenza tra i siti (suoli) e significativa la differenza tra le due giaciture.

Nell'installazione delle fascine sperimentali si è stimata la crescita delle piantine in fitocella di *S. junceum* messe a dimora in diversi substrati. Dalle prime evidenze le piante cresciute sul substrato costituito dai residui di *P. oceanica* hanno presentato la maggior percentuale di attecchimento e la maggiore crescita epigea.

Tale risultato può essere, con buona probabilità, attribuito alle proprietà fisiche ed alla capacità isolante dei residui. Difatti, la maggiore capacità drenante del substrato costituito dai residui di *P. oceanica*, rilevato durante le prove di infiltrazione, sembra aver giocato un ruolo positivo nell'attecchimento e sviluppo della pianta.

Il controllo del microclima all'interno delle fascine è stato eseguito con misure di temperatura rilevate ad intervalli di 30 minuti da sensori hobo data logger inseriti ad una profondità di 5 cm, lasciati indisturbati per tutta la durata delle misure (dal 14.07.2017 al 20.11.2017).

I dati sono stati misurati: a) nell'ambiente atmosferico, b) all'interno dei residui di *P. oceanica* contenuti nelle fascine e c) nel terreno contiguo all'istallazione. In totale sono stati raccolti 6201 valori di temperatura per ognuno dei tre sensori.

Le misure di temperatura hanno evidenziato l'elevata capacità isolante dei residui di *P. oceanica* che si è manifestata con una significativa attenuazione, a livello dell'apparato radicale, delle temperature massime (36.6°C) nei residui di Posidonia e minime giornaliere (9.7°C), rispetto alle temperature massime (55.1°C) e minime (5.6°C) misurate nell'ambiente esterno nei due periodi considerati (estate e autunno). Le temperature medie più basse si sono registrate nei residui di Posidonia all'interno delle fascine, sia nel periodo estivo (25.7±3.6) che nell'arco temporale delle misure (21.8±5.2). È interessante osservare come il ruolo che tale materiale ha nel campo dell'edilizia come isolante termico possa risultare di interesse anche nel campo della coltivazione di specie vegetali.

Infine, la ricerca svolta nei tre anni di dottorato ed i risultati conseguiti hanno portato al miglioramento della tecnica di realizzazione della fascinata le cui metodologie sono oggetto di una domanda di brevetto depositata dall'Università di Palermo.

I vantaggi della nuova metodologia rispetto alle tecnologie attuali, possono sintetizzarsi come segue:

- Riutilizzo sostenibile di materiali organici di scarto (sarmenti e *P. oceanica* spiaggiata e dilavata) con conseguente economia di realizzazione di una fascinata (opera I.N. lineare di consolidamento e protezione idrogeologica).

- Meccanizzazione della produzione dei manufatti modulari (fascina) costituenti l'opera, che nell'attuale pratica prevede un assemblaggio solo di tipo manuale, con conseguente riduzione dei tempi di costruzione e dei costi ad esso associati.
- Il prodotto proposto rende "strutturale", con un sistema di collegamento dei moduli, un'opera che staticamente non è resistente alle azioni di spinta delle terre.
- Riduzione dei tempi di messa in opera del manufatto lineare.

Con la tecnica innovativa avanzata, grazie alla caratteristica strutturale del manufatto, si potranno realizzare opere su più piani (non più di tre) o opere chiuse.

I residui di potatura della vite ed i residui di *P. oceanica* sono stati utilizzati anche nell'ambito di un progetto, finanziato dalla Comunità Europea, al Comune di Custonaci dal titolo "*Primi interventi finalizzati a contenere il fenomeno della desertificazione del territorio Comunale Parco sub-urbano Portella del Cerriolo*". Recenti controlli di qualità dell'Unione Europea sulle opere realizzate con i suddetti materiali di scarto nel Parco sub-urbano Portella del Cerriolo a Custonaci, hanno evidenziato gli ottimi risultati raggiunti dal progetto. Per tale motivazione, La UE ha proposto la candidatura del suddetto progetto come *best practices* nell'area mediterranea per la lotta al fenomeno della desertificazione.

L'uso dei due materiali, che rappresentano uno scarto di produzione agricola ed un rifiuto solido, ampiamente presenti sia in Sicilia che nella maggior parte dell'area mediterranea, si inquadra in un uso efficiente delle risorse (riuso sostenibile), nel risparmio economico ed energetico e nel pieno rispetto dell'ambiente.

Long Abstract

The world population is expanding continuously, and economic and demographic growth are leading to the exploitation of the environment and the reduction of natural resources (water and energy in particular), with potentially important impacts on global climate change.

Therefore, more efficient management of resources is necessary, based on the reworking of sustainable objectives of environmental policies and strategies and lower consumption of resources, thus promoting the transition from a linear economy model to a circular one, consisting of a continuous positive development cycle that preserves and improves natural capital, optimizing the use of resources.

Soil and Water Bioengineering uses plants as living building material in environmental and landscape development works. Such works with low environmental impact, promote biodiversity and, in addition, offer a promising strategy for mitigation and adaptation to climate change.

Thus, the use of adequate, sustainable, easy to find and low-cost materials are essential for the achievement of these objectives.

Considering the great availability of residues resulting from the annual pruning of vines and the annual cleaning of beaches from the leaves of *Posidonia oceanica* in Sicily, the aim of this thesis is to describe and apply innovative Soil and Water Bioengineering techniques that involve the construction of modular structures made with organic waste materials, namely, the residues of vine pruning (vine shoots) and beachside *P. oceanica* (banquette).

In fact, every year, the pruning of vines produces high quantity residues (vine shoots), which represent a biomass to be disposed. At the same time, the beaching of *P. oceanica* residues is considered a problem by the population. It conflicts with a number of economic activities (tourism, bathing establishments, etc.). Even though seagrasses have a fundamental ecological role to play in limiting coastal erosion and promoting the formation of the coastal dune system, the presence of *P. oceanica* residues along the coast can reduce the tourism value of beaches. As a result, local authorities are required to remove *banquette* and dispose of them in landfills.

Therefore, the use of this biomass has a double beneficial effect. It constitutes a solution to the problem of waste disposal and an opportunity for the creation of local and low-cost new products. Moreover, this waste can also be used in the field of environmental restoration. Therefore, the residual biomass considered a resource and no longer as waste, and has ecological and economic value.

From the viewpoint of the circular economy, vine shoots were assembled in the form of fascines to constitute the basic element used to create a fascinate module, a linear Soil and Water Bioengineering work with anti-erosive, consolidation and stabilization functions, while the residues of *P. oceanica* were used as a growing medium to render the work "alive" after planting with native species.

A series of analyses and experiments were carried within the framework of the thesis, in order to *i)* characterize both materials and evaluate their suitability as constituents of fascines, *ii)* identify the most biotechnically suitable plant species for rendering the work “alive”, and *iii)* evaluate the functionality of the work as a whole using observations made on a small prototype of fascinate set up in experimental fields at the University of Palermo.

Finally, an innovative fascinates construction technique is presented, which is the object of patenting by the University of Palermo and was developed during the activities of this research doctorate.

First of all, we identified four wine-producing companies operating in Sicily and available to provide vine shoots just after pruning and free of charge.

In order to estimate the durability of the experimental fascines, mechanical tests were carried out in the laboratory (tensile strength and modulus of elasticity) on 122 samples of 8 different vine shoot cultivars (Cabernet, Inzolia, Nero d' Avola, Grecanico, Grillo, Chardonnay, Sirah and Catarratto). The vine shoot samples, L=10 cm long and "normal" humidity (12%), were selected based on the criteria of absence of knots and imperfections, uniformity of diameter and straight longitudinal axis (cylindricality). The abiotic (mechanical) durability of the vine shoots was then estimated by means of flexural strength tests and measurement of tensile strength.

Under the hypothesis of validity of Hook's law, flexural strength tests were carried out according to the three-point scheme up to the rupture of the lower fibres of the samples, which allowed to obtain the longitudinal elasticity modulus E (along the fibres) and the tensile strength σ, on the basis of the force/deformation diagram (F/δ) and tensile strength, F_{max}.

The first results show that Cabernet, Grillo and Sirah vine shoots have the best flexural strength characteristics (greater rigidity) with a clear prevalence of Sirah (4878.6 MPa), while the vine shoots of Grecanico, Chardonnay, Catarratto and Nero d' Avola (1200 - 2000 MPa) are the most deformable. The highest values of tensile strength were found for the Cabernet (70 MPa).

Consequently, by linking sample tensile strength to the corresponding elasticity modules, Cabernet and Chardonnay display the best resistance and durability characteristics, and could be used potentially as a building material in Soil and Water Bioengineering works.

Therefore, Cabernet vine shoots have been suggested and used for the packaging of fascines in the experimental installation, together with Catarratto, which is the variety most cultivated in the region and, consequently, produces the largest quantity of annual biomass.

P. oceanica residues were collected on the coast of Custonaci, Trapani (Southern of Italy). The "*banquette*" from which the residues were obtained is 4 metres high and extends hundreds of metres along the rocky coast behind Monte Cofano. *P. oceanica* residues were removed mechanically and deposited in a storage area created in the nearby Custonaci Park.

In order to evaluate the reduction of salinity by natural runoff, the infiltration process that takes place in the residues of *P. oceanica* accumulated at the storage sites was studied. The investigation carried out on samples of *P. oceanica* residues subjected to rain of fixed intensity, allowed the development of a simplified theoretical model, valid for highly permeable porous storage.

Furthermore, an analysis was performed in order to characterise *P. oceanica* residues from a physical and hydrological point of view and verify the applicability of a physical infiltration model for the estimation of delay time, starting from the beginning of the rainy event and ending with the storage site.

The experimental protocol was studied in order to modify gradually the initial humidity conditions of the same sample and not modify the physical characteristics of the sample for the results to be homogeneous. The samples of *P. oceanica* residues, prepared in the laboratory with an apparent density equal to that measured on undisturbed samples at the storage site, were placed in metal rings, D = 200 mm, with free draining at the bottom, closed with non-textile and metal mesh containment. The infiltration tests were conducted with a rain simulator equal in diameter to that of the rings, and connected to a Mariotte bottle.

In the test sequence, the initial humidity conditions $\Theta_0$varied from 0.030 to 0.197, while the drained volume $\Theta 0,_{VD}$ increased from 0.030 to 0.32. Modification of the initial humidity condition had an effect on delay times. In particular, the times, with certain dispersion, increased byΘ_0 from the initial values of 3.87 minutes for the first test to 13.62 minutes for the last test.

The apparent densityρ_β, empirically estimated as a function of the height H of the sample, showed a variation from 0.130g/cm^3 to 0.140 g/cm^3 which resulted in a reduction of porosity, θ_σ. The tests carried out showed that the compaction of *P. oceanica* residues played a decisive role during the infiltration process.

Following this observation, the infiltration model $t_d(\Theta o)$ on highly porous media was modified by introducing the effect of both compaction and that of the surface actually affected by the infiltration process.

The infiltration law calibrated on the experimental data for rain intensity values varying from i=20 to i=100 mm/h, for *P. oceanica* storage, compared with the analogous infiltration law relative to soil with the same hydrological characteristics as stored *P. oceanica*. The difference in behaviour of the two media was revealed.

P. oceanica residues show very short delay times in relation to soil (fast filtration); small differences are measured in the intensity and the initial humidity conditions. While the soil shows a typical monotonous reduction in delay times, for *P. oceanica* there is a slight increase in time after a given initial humidity condition, which indicates a slight reduction in permeability of the medium in this field.

The reduction of salinity in *P. oceanica* residues was evaluated in the laboratory by means of a constant pressure washing process. *P. oceanica* residue samples show a high initial electrical conductivity (EC) value in drainage water (20 mS/cm) and a rapid reduction of the salt content with the first three unit washes. The six additional washings refined EC reduction to an acceptable level for agricultural use (2 mS/cm).

The extreme values of the residue washing process were confirmed by salinity analysis using the standard method with dilution 1:20.

The reduction of the salt content of *P. oceanica* residues was also achieved in a sustainable way by means of natural runoff in open storage for more than one year (≈ 500 mm/year of rain). The measurements taken at the first unit wash showed an EC of 1.8 mS/cm, which was reduced by 33.3% (CE=1.2 mS/cm) after the second unit wash.

The most biotechnically suitable plant species were then identified to make the work “alive” by means of laboratory tests of Tr tensile strength of the roots. The native plant species used to make the fascine “alive” were collected at 5 different stations in the province of Palermo.

The high tensile strength values of the roots of the plants considered in the study (*A. mauritanicus, O. miliaceum, H. coronarium. M. lupulina, L. spartum, B. distachyon, R. officinalis, R. Coriaria* and *S. junceum*) confirm their suitability in the field of environmental restoration, slope stabilization and landslide prevention. In particular, *S. junceum* displayed the best biotechnological characteristics in relation to the tension/diameter law and has therefore been identified as a material to be used for making fascine “alive”.

A more detailed analysis of the morphological parameters of *S. junceum* roots, growing at two different positions (plane and slope of 22°- 28°- 40°), showed that the position on the slope significantly influences the root system of the plant and the overall architecture of the root system at the three sampling sites (A, B and C).

In the tensile strength tests carried out, in accordance with the greater development and the different radical architecture, the samples of break strength values taken in a slope position showed the highest break strength values. As regards the lowest diameters (0.5 mm), the break strength values are similar (61-70 MPa) in the two positions, while for larger diameters (2 mm) the break strength values of plane samples are lower than those of slope samples. In fact, they range from 20 MPa to almost 80 MPa at site A, 20 MPa to 50 MPa at site B, and 20 MPa to 40 MPa at site C.

In the experimental installation, we estimated the growth of *S. junceum* planted in different substrates. The first evidence shows that the plants grown on the substrate consisting of *P. oceanica* residues showed the highest percentage of rooting and the greatest aerial growth (121.3 cm).

This result can, most probably, be attributed to the physical properties and insulating capacity of the residues. In fact, the increased draining capacity of the substrate of *P. oceanica* residues, detected during infiltration tests, may have played a positive role in plant rooting and development.

The micro-climate inside the fascines was estimated with temperature measurements using hobo data logger sensors inserted at a depth of 5 cm from 14.07.2017 to 20.11.2017, carried out continuously and with a time interval of 30 minutes.

The data were recorded: a) in the external environment, b) inside the *P. oceanica* residues contained in fascines and c) in the land adjacent to the installation. A total of 6201 temperature values were collected by each of the three sensors.

The temperature measurements showed the high insulating capacity of the *P. oceanica* residues, which manifested itself with a significant attenuation, at root level, of the maximum temperatures (36.6°C) in *P. oceanica* residues and daily minimum temperatures (9.7°C), compared to the maximum temperatures (55.1°C) and minimum temperatures (5.6°C) measured in the external environment during the two periods considered (summer and autumn). The lowest average temperatures were recorded in *P. oceanica* residues inside fascines, both in the summer period (25.7±3.6) and throughout the measurement period (21.8±5.2). It is interesting to note that the thermal insulation role of this material in the building industry also applies to agriculture.

Finally, the research carried out during the three years of doctoral studies has led to the improvement of the fascinate production technique, and this methodology is subject to a patent application filed by the University of Palermo.

The benefits of the new methodology compared to current technologies can be summarised as follows:

- The proposed product makes "structural", with a module connection system, a work frequently used in Soil and Water Bioengineering that is not statically resistant to the actions of soil thrust.
- Sustainable reuse of organic waste materials with consequent economy of construction.
- Mechanisation of modular manufactured products, which in current practice provides for assembly only by hand with consequent reduction of construction time and costs.
- Reduction of installation time for hydrogeological protection structures.

The advanced innovative technique, to be developed with future experimental installations, has provided for the construction of a modular building made with eco-compatible materials at low cost; vine pruning residues (vine shoots) and *Posidonia oceanica* beaches (banquette).

Vine pruning residues and *P. oceanica* residues were also used in a project, funded by the European Community, to the Municipality of Custonaci entitled " *Primi interventi finalizzati a contenere il fenomeno della desertificazione del territorio Comunale Parco sub-urbano Portella del Cerriolo*". European Union quality controls on these works has shown the excellent results achieved with the waste materials. For this reason, the EU has suggested project application as “best practices” in the mediterranean area for combating desertification.

The use of these two materials, namely agricultural production waste and solid waste which are widely available in both in Sicily and most of the Mediterranean area, constitutes an efficient use of resources (sustainable use) that is low-cost, energy efficient and totally respects the environment.

Introducción

La biomasa derivada de residuos de podas agrícolas, forestales y varadas, representa un recurso natural y renovable presente y disponible en abundancia en el territorio siciliano y, de forma más general, en el área mediterránea. En Italia, la superficie dedicada al cultivo de especies herbáceas es de 2.943.000 hectáreas (ha). Entre estas especies, encontramos el trigo, la avena, la cebada, el centeno, el arroz, el maíz y el girasol.

Las especies leñosas por su parte, cubren una superficie total de 349.950 ha, entre estas, tenemos los frutales: manzanos, peras, melocotones, cerezos, nectarinas, ciruelas, albaricoques, cítricos, avellanos y almendros. Además, cultivos como el olivo y la vid ocupan 1.161.580 ha y 669.108 ha, respectivamente. (Agri Istat, 2017).

En el campo forestal, el bosque latifoliado cubre un área de 5.942.912 ha, el bosque de coníferas cubre un área de 1.172.806 ha, mientras que el bosque mixto latifoliado y de coníferas cubre un área de 840.883 ha (INFC, 2005).

En el Mar Mediterráneo también hay cuatro especies de fanerógamas marinas autóctonas (Fig. 1). *Posidonia oceanica (*Linnaeus) Delile y *Cymodocea nodosa* (Ucria) están ampliamente distribuidas formando extensas praderas, mientras que *Nanozostera noltii* (Hornemann) y *Zostera marina* (Linnaeus) son menos comunes. (Gambi *et al*., 2009).

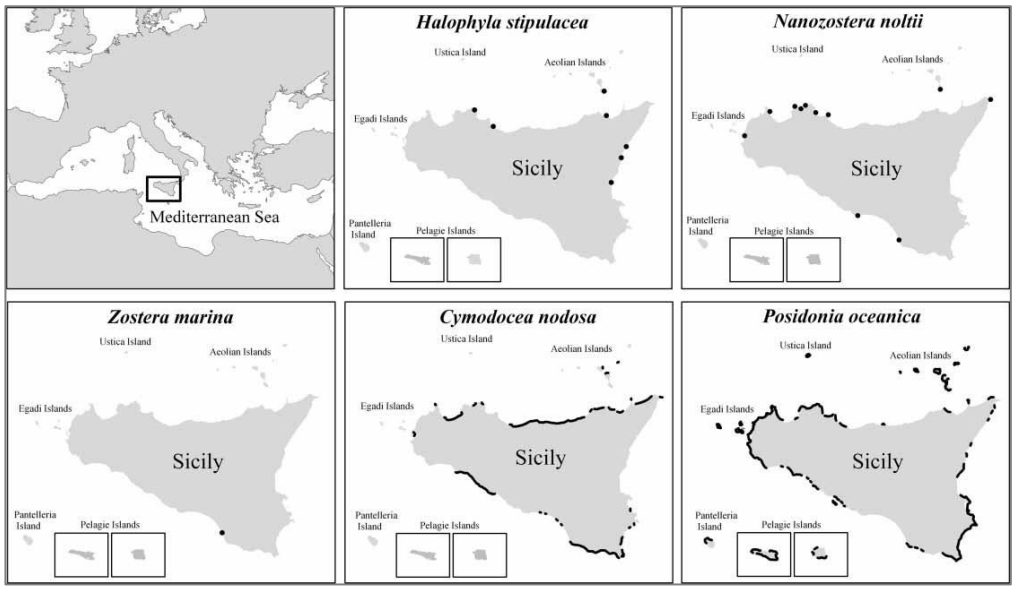

Figura 1 - *Distribución de las fanerógamas marinas en Sicilia (Calvo et al., 2010).*

P. oceanica es la especie más abundante (Den Hartog, 1970) cubriendo aproximadamente 4.000.000 ha de fondo marino (Pergent, 1993). Las cuatro plantas están presentes en el plano infralitoral de Sicilia (0 - 40 metros de profundidad).

Los residuos de la producción agrícola de cultivos herbáceos y arbóreos alcanzan cerca de 5.4 Mt/año de materia seca, de los cuales aproximadamente 1.7 Mt son de poda. En el caso de los cultivos arbóreos, el residuo procede de la poda de ramas sobre una base anual o bienal (Enea, 2009). La biomasa derivada de residuos forestales se origina en 1.8 Mt/año en el bosque latifoliado y 126 Kt/año en el de coníferas (Enea, 2010).

P. oceanica, como todas las plantas superiores pierde cíclicamente las hojas, lo que supone alrededor del 25%, y las cuales se depositan a lo largo de las zonas costeras (Duarte, 2004). Dado que la producción de biomasa por unidad de superficie es del orden de 500 $g*m^2$/año de materia seca, la cantidad de material que llega a la costa depende no sólo de la corriente y los vientos, sino también del tamaño de las praderas. En un año, una pradera de 1 km de anchura puede producir hasta 125 kg de biomasa seca por metro de costa (Duarte, 2004). Una característica de *P. oceanica* es su alta producción de biomasa, que varía entre 2 y 10 t/ha/año, valores muy altos si pensamos que una hectárea de bosque tropical produce hasta 2 t de biomasa en un año (Boudouresque *et al.*, 2006).

El informe anual de *Ambiente Italia* documenta los progresos de Italia en la reutilización de materiales en toda Europa. El consumo absoluto de materias primas en los últimos años ha disminuido en un 40% (355 millones de toneladas anuales extraídas del planeta entre 2000 y 2013) y la intensidad del consumo en comparación con el PIB muestra una reducción del 39%, lo que indica una inversión de la tendencia en comparación con las últimas décadas del siglo pasado (Bianchi y Zanchini, 2014).

Además, se ha estimado que la inversión total en el sector de la biomasa entre 2008 y 2021 llegará a los 104.000 millones de dólares (Hakeem, 2014). En particular, la producción de biomasa agrícola está creciendo constantemente y probablemente, con la presión demográfica acelerada a la que el planeta está y estará sometida (Statista, 2017), seguirá creciendo en el futuro. La biomasa es también la cuarta fuente de energía más grande del mundo, después del carbón, el petróleo y el gas natural.

El uso de la biomasa producida tiene una doble ventaja: la solución al problema de la eliminación de los residuos producidos y la creación de nuevos productos, locales y de bajo coste, reutilizables

en el campo de la restauración medioambiental. La biomasa residual es vista de esta manera como un recurso y no como un residuo, adquiriendo valor ecológico y económico.

En particular, la cultura de la vid en Sicilia tiene su origen en los conocimientos antiguos e implica aspectos sociales, económicos y medioambientales de excepcional importancia. En el panorama vitivinícola nacional, Sicilia siempre ha jugado un papel fundamental, sobre todo en términos cuantitativos: con 118.826 ha de viñedo, es la región con mayor superficie plantada de viñedo del país (Agri Istat, 2017) con una producción de biomasa de 0.3 Mt anuales (Istat, 2014).

El descubrimiento de vides fosilizadas silvestres data de la era terciaria. Millones de años antes de la aparición del hombre, existía una actitud antigua y una propensión arcaica de una tierra donde la vid crecía espontáneamente. Sicilia, por tanto, ocupa un papel protagonista en el redescubrimiento de las raíces filogenéticas, así como de las raíces históricas y culturales de la viticultura europea y mundial (Pastena, 2009).

Según datos del Departamento de Agricultura y Silvicultura actualizados en 2011, el cultivar más común en Sicilia es el Catarrato Blanco, que con una superficie de 30.368 ha, representa el 26,94% de la superficie plantada con viñedos en Sicilia, seguido de Nero d' Avola con 18 ha (16,23%). Inzolia con 6.783 ha (6.02%); no muy lejos de Grillo (6.55%), Trebbiano toscano(6.02%), Syrah (primera de las variedades internacionales con 4,81% del total) y Chardonnay (4,41%).

P. oceanica es la planta marina más común en la costa siciliana, cubriendo cerca de 76.000 ha de superficie. El 55% de las praderas de *P. oceanica* presentes en Sicilia se concentra en la costa occidental de la isla (Calvo *et al*., 2010), caracterizada por altos valores de cobertura y producción primaria. La producción anual de biomasa, de acuerdo con las indicaciones de Duarte (2004), se sitúa en torno a 0.09 Mt, de las cuales 0.05 Mt sólo en la costa oeste de la isla.

Vitis vinifera y *P. oceanica* tienen, respectivamente, un ciclo anual de poda de ramas y caída de hojas, lo que representa una alta fuente renovable de biomasa.

Bioingeniería del Paisaje

La Bioingeniería del paisaje (B.P., italiano: *Ingegneria Naturalistica*; alemán *Ingenieurbiologie*; inglés: *Soil and Water Bioengineering*; francés: *Génie Biologique*) es una disciplina técnico-biológica que utiliza plantas vivas en intervenciones de anti-erosión y consolidación. En general, la combinación con otros materiales (madera, tierra, roca, geotextiles, redes galvanizadas, etc.), para la reconstrucción de ecosistemas naturales y para la restauración del paisaje y del territorio (Eropean Federation for Soil and Water Bioengineering, 2015).

Los campos de intervención van desde los tradicionales campos de consolidación de taludes y deslizamientos, hasta la recuperación de áreas degradadas (cuevas, vertederos, obras de construcción), pasando por la mitigación de impactos relacionados con la construcción de obras de ingeniería (barreras acústicas y barreras visuales, filtros que impiden la difusión de polvo, ecosistemas-filtro aguas abajo de los vertidos, etc.), la integración medioambiental de las infraestructuras lineales de transporte (descarte de carreteras y ferrocarriles), la renaturalización de los cursos de agua, etc. (Boccalaro, 2012).

Los objetivos de las intervenciones de Bioingeniería del Pasaje se dirigen principalmente a:

- Técnica-funcional (anti-erosión y consolidación de taludes);
- Naturalista, en la medida en que el propósito no es simplemente cubrir el verde, sino la reconstitución o desencadenamiento de comunidades vegetales pertenecientes a la serie dinámica autóctona;
- Estética y paisajismo para su inclusión en el paisaje natural;
- Económicas, como alternativas y competitivas a las obras tradicionales.

Las intervenciones de Bioingeniería del Paisaje se distinguen de las intervenciones tradicionales en:

- Evaluación de las características microclimáticas, geomorfológicas y edafológicas de las zonas de intervención;
- Análisis floral y vegetativo, con especial referencia a la reconstrucción de la serie dinámica y la identificación de las especies de uso según sus características biotécnica;
- Uso de materiales no tradicionales, como los geotextiles sintéticos, en combinación con plantas o partes de ellas;
- Selección detallada de las especies vegetales a utilizar (mezcla de semillas, especies de árboles y arbustos, esquejes, rizomas, transplantes de terrón);

- Combinación de la función de consolidación con la función de reintegración ambiental;
- Mejora a lo largo del tiempo de estas funciones para el desarrollo de las partes aéreas y radiculares de las plantas.

El estudio de una intervención de Bioingeniería del Paisaje implica las siguientes fases:

- Estudios bibliográficos;
- Investigación geológica y geomorfológica;
- Estudios de suelos;
- Estudio floral y vegetativo para identificar las especies adecuadas;
- Definición de criterios de diseño
- Definición de las tipologías de Bioingeniería del Paisaje;
- Lista de especies florales a utilizar.

Las técnicas de Bioingeniería del Paisaje aplicadas hasta ahora en Europa Central pueden distinguirse (Schiechtl, 1992; Oplatka, 1996) en las siguientes categorías de intervenciones:

- Recubrimiento o anti-erosión (todos los métodos de siembra, etc);
- Estabilizadores (plantación de arbustos, esquejes, estacas, escalones, fajinas, etc.);
- Consolidación y tipo combinado (balastos vivos, muros, rejillas vivas, paredes de piedra seca con esquejes, cuña filtrante, gaviones y colchones verdes, tierra reforzada, etc.);
- Especiales (barreras antirruido y barreras contra caídas de rocas, cortavientos, etc.).

El interés por la BP se manifiesta también en los manuales técnicos publicados en los últimos años, como los elaborados por las Regiones de Emilia-Romagna, Véneto, Lacio, Toscana, Liguria, Lombardía, Marche y Campania, por las Provincias de Bolzano, Trento y Terni y por el Ministerio de Medio Ambiente. Se puede decir, por tanto, que en Italia la Bioingeniería del Paisaje ha superado ya su fase pionera y está siendo acreditada por Universidades, administraciones públicas y profesionales del sector como herramienta fundamental para salvaguardar el territorio y la mejora del medio ambiente (Boccalaro, 2012).

La fajinas en las obras de Bioingeniería del Paisaje

La fajina es el producto de la ligadura de ramas de madera de pequeño diámetro para un uso principalmente de fuego, de origen muy antigua. Su uso en las obras de protección y conservación del suelo es más reciente, pero en cualquier caso se remonta a hace unos siglos.

En el campo de la Bioingeniería del Paisaje, las fajinas están incluidas en la categoría de intervenciones de estabilización. Estas intervenciones permiten una excelente recuperación natural de áreas degradadas, favoreciendo la consolidación de taludes, el posterior desarrollo de la cubierta vegetal y la restauración de ecosistemas naturales deteriorados.

La facilidad de aplicación de este artefacto permite la construcción modular también de obras de gran extensión, de estructura simple, compleja o en combinación con otros materiales. La elasticidad y densidad de la obra dependen de las especies de madera utilizadas y del grado de compresión ejercidas en la fase de fabricación. La obra, hecha de ramas muertas, puede incluir plantación de esquejes o plántulas en un sustrato adecuado. La técnica consiste en la instalación de estructuras lineales o zonales, organizadas con un trazado de obras lineales (Ligato *et al*., 2002).

Tipo de intervención con sistemas basados en el uso de fajinas:

- Protección y estabilización del suelo;
- Reducción de los procesos de erosión profundos (*gully*);
- Drenaje superficial;
- Intervención de estabilización de taludes.

Los ámbitos de intervención son:

- Cursos fluviales;
- Taludes;
- Zonas costeras (dunas);
- Regeneración ambiental en áreas protegidas y urbanas.

Objetivo de la investigación

La Bioingeniería del Paisaje (BP) propone obras menos perjudiciales para el medio ambiente que contribuyen al mantenimiento de la biodiversidad, ofreciendo también una estrategia de mitigación y adaptación al cambio climático (Duarte *et al*., 2013). Importante, para lograr todos estos objetivos, es el uso de materiales adecuados, fácil de encontrar y de bajo coste.

Considerando la gran disponibilidad de residuos resultantes de la poda anual de la vid y la acumulación de las hojas de *P. oceanica* en las playas cada año, esta tesis tiene como objetivo la descripción y la aplicación de técnicas innovadoras de Bioingeniería del Paisaje para la construcción de artefactos modulares hechos con materiales orgánicos: los residuos de poda de vid (sarmientos) y los residuos de *Posidonia oceánica (banquette)*.

Los residuos de poda de vid, ensamblados a mano o mecánicamente en forma de fajinas constituyen el elemento base para realizar las obras anti-erosión y de estabilización. A su vez, los residuos de *Posidonia oceánica,* reduciendo el contenido de sales, sirven de sustrato para el crecimiento de las plantas autóctonas (Fig. 2).

Figura 2 - *Esquema de proyecto de las fajinas ensambladas con materiales orgánicos de desecho.*

El uso de estos dos materiales representan residuos de producción y residuos sólidos muy abundantes en el territorio siciliano y, en general, en el Mediterráneo. El objetivo es, por tanto, un reúso eficiente de los recursos locales y de forma más sostenible. En particular, se analizan algunos aspectos peculiares de ambos materiales para evaluar sus aptitudes para la creación de la obra y se

realizan actividades experimentales para detectar su funcionalidad. En la parte final, se presenta una innovadora técnica constructiva de fajinas patentada, en colaboración con la Universidad de Palermo, nacida de las actividades de este doctorado.

La economía circular

La economía circular es un concepto económico que se interrelaciona con la sostenibilidad y cuyo objetivo es que el valor de los productos, los materiales y los recursos (agua, energía,…) se mantenga en la economía durante el mayor tiempo posible, y que se reduzca al mínimo la generación de residuos. Según la definición de la Fundación Ellen MacArthur (MacArthur, 2013), en una economía circular, los materiales tienen dos tipos de flujos: flujos biológicos, que pueden ser reintegrados en la biosfera y flujos técnicos, que están destinados a ser valorados sin entrar en la biosfera (Fig. 3).

La economía circular es, por tanto, un sistema en el que todas las actividades, a partir de la extracción y la producción, se organizan de tal manera que los residuos de una persona se convierten en un recurso para otra.

La economía circular es una alternativa del presente modelo económico lineal que se caracteriza por la simple sucesión "extracción-producción-consumo-desecho". La economía lineal se basa en disponer de grandes cantidades de energía y otros recursos baratos y de fácil acceso, pero está llegando ya al límite de su capacidad física (MacArthur, 2013).

En comparación con el modelo económico lineal, en el que la materia se consideraba sólo en su relación unidireccional al producto, la economía circular pasa a formar parte de un sistema potencial en relación con otros.

Estos sistemas pueden ser ciclos industriales o de la biosfera, como en este proyecto de investigación, en el que los materiales tienen una derivación biológica y renovable.

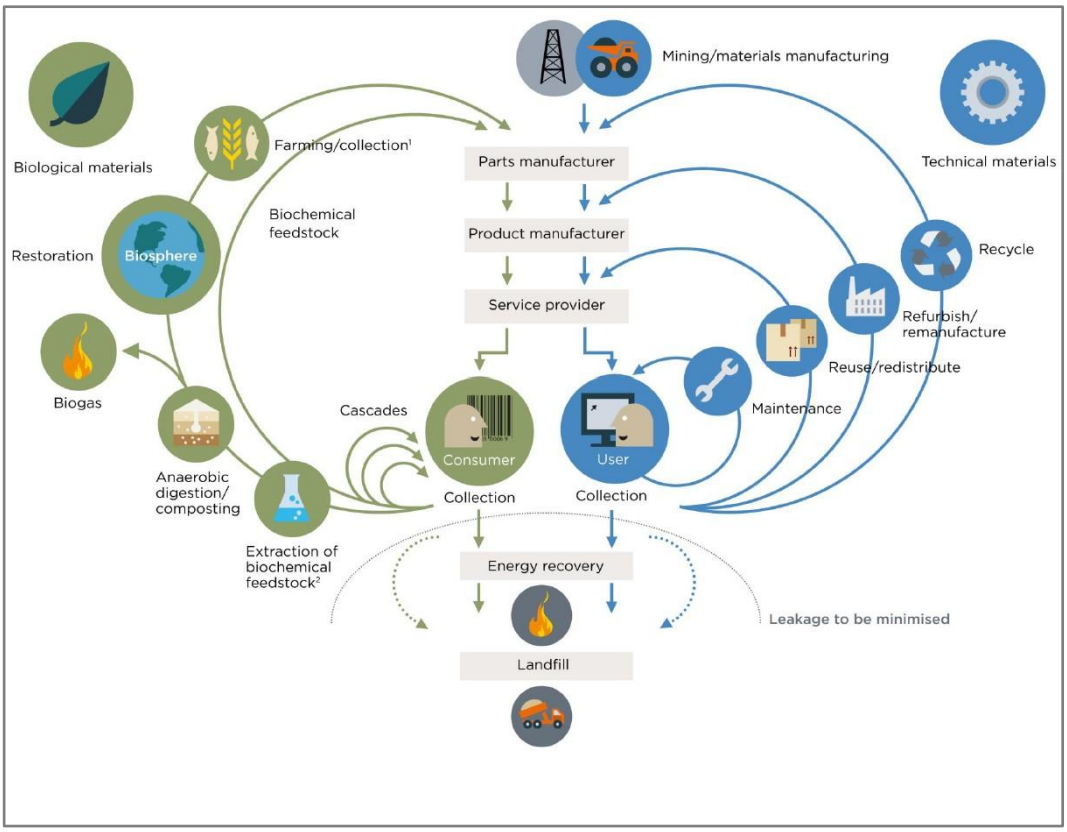

Figura 3 - *Diagrama del sistema de economía circular (Fuente: Fundación Ellen MacArthur).*

La idea de la economía circular comprende diferentes prácticas que se pueden reconducir a cinco estrategias principales (Pellizzari y Genovesi):

- Cadena circular;
- Recuperación y reciclaje;
- Extensión de la vida útil de un producto;
- Desarrollo de plataformas de intercambio;
- Cambio de productos a servicios.

La estrategia considerada en esta tesis se refiere al segundo punto: la **recuperación** de residuos orgánicos que, mediante el **reciclaje**, identificando un nuevo uso, no rompe su ciclo energético y productivo. El material asume así un papel central (Fig. 4).

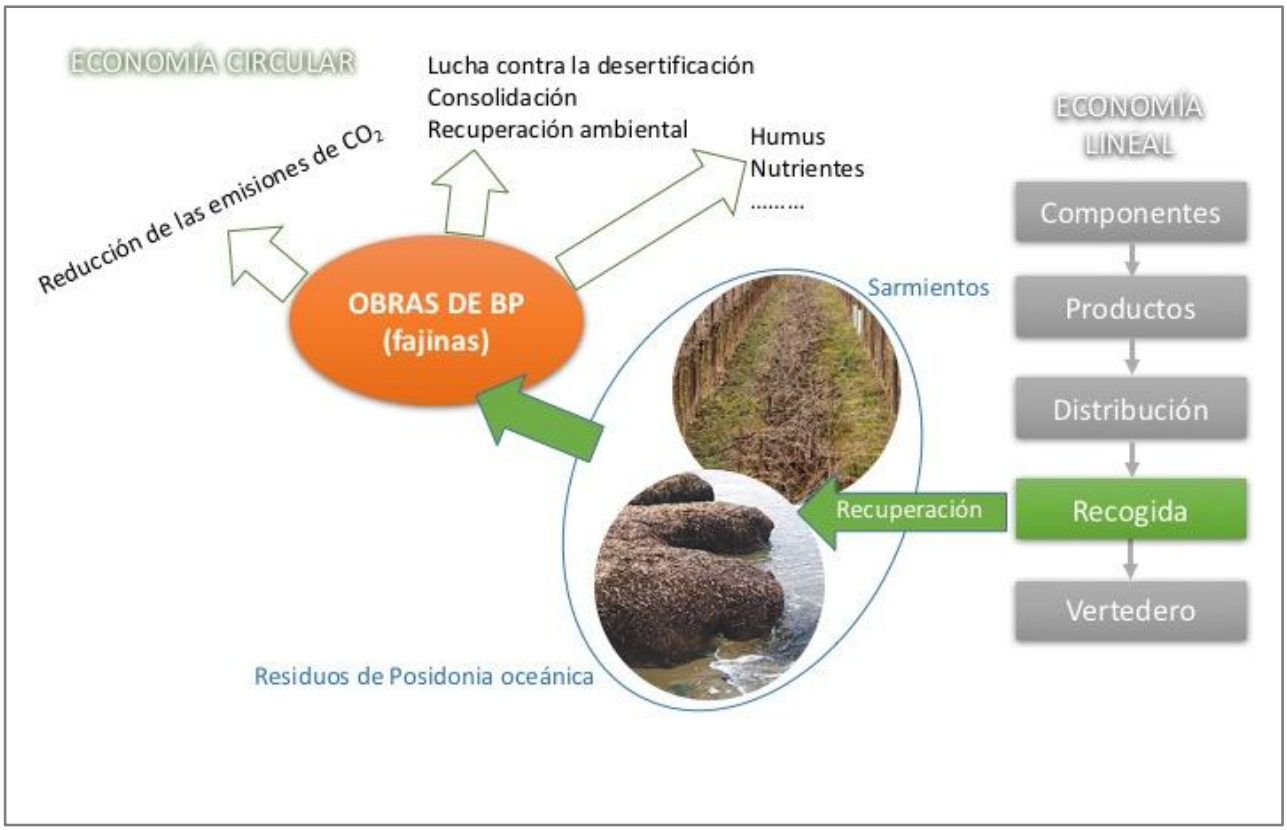

Figura 4 - *Diagrama del sistema de economía circular en el proyecto de tesis.*

Neomateriales

Uno de los pilares sobre los que se basa la economía circular son los materiales biológicos. Todas aquellas materias primas que tiene la naturaleza "viva" orgánica y renovable, y que son capaces de volver a la tierra una vez terminado su ciclo de vida. Los materiales de origen vegetal también tienen una huella de carbono que tiende a ser neutra, porque a lo largo de su vida útil absorben CO_2 en la misma cantidad que la liberada a la atmósfera al final de su vida (Pellizzari y Genovesi, 2017).

Es una vasta familia de materiales, muchos de los cuales son tradicionales, nacidos, cultivados y recogidos mediante procesos de cultivo.

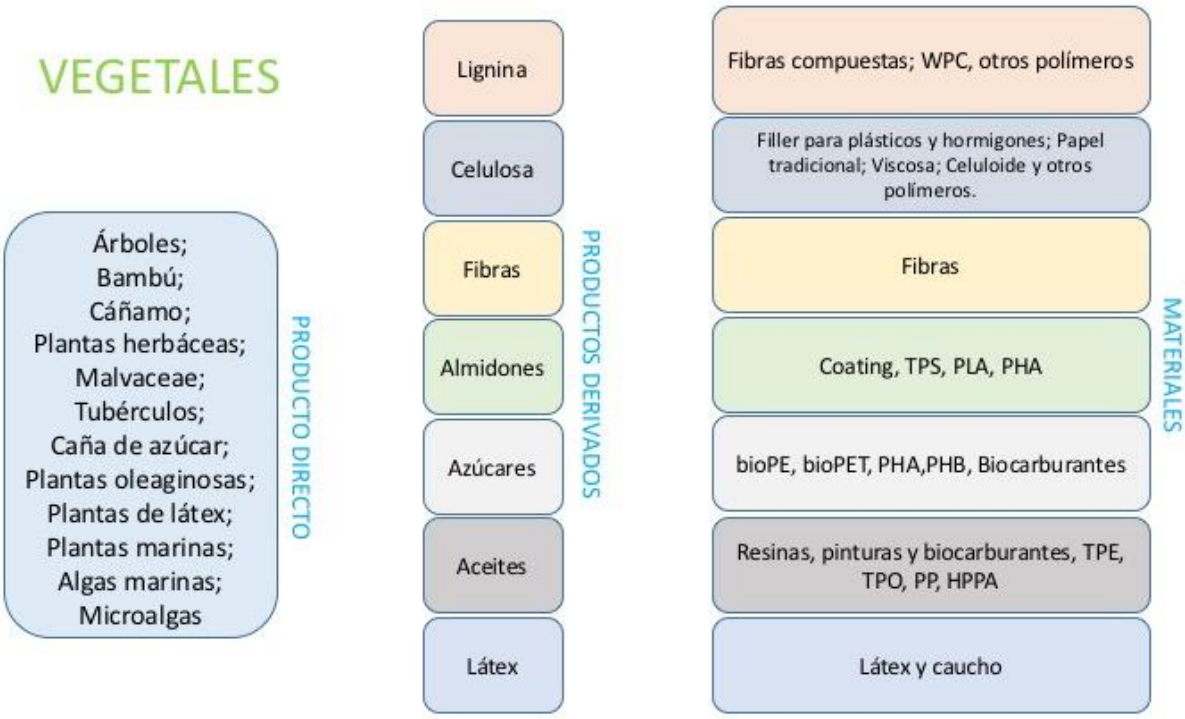

Figura 5 - *Diagrama de productos y derivados de los neomateriales vegetales (Pellizzari y Genovesi, 2017).*

Este área incluye todos los materiales derivados de plantas del que se obtienen la madera y la celulosa o las fibras, como la paja utilizada para acolchado y mobiliario, o como materiales de construcción (Fig. 5). Las materias primas de origen animal también se incluyen en la categoría de materiales biológicos. Objetos hechos de lana, seda, huesos, plumas, pieles de cera de abejas, por nombrar algunos.

Los nuevos procesos tecnológicos han permitido que las materias primas más tradicionales evolucionen en direcciones cada vez más eficientes. La investigación ha dado lugar a una nueva

categoría de materiales biológicos que abre un mercado de competencia con los materiales sintéticos.

Mientras que en la década de 1950 los plásticos sustituyeron gradualmente a los materiales vegetales, hoy en día asistimos a un proceso inverso. El uso de nuevos materiales, como alternativa a las materias primas tradicionales, ha permitido la creación de productos, patentados a nivel internacional, aplicables a una amplia variedad de campos.

A continuación, se presentan algunos ejemplos de productos que pueden ser utilizados en el tiempo libre, vida cotidiana, ámbito de la construcción y en la Bioingeniería del Paisaje.

- ✓ **Yulex pure** es un material de espuma de célula cerrada de alto rendimiento que puede reemplazar derivados del petróleo como el neopreno. Producido a partir de plantas de Hevea cultivadas en los Estados Unidos o de Gayule, originaria de Centroamérica, se utiliza para la producción de trajes de surf (foto 6a).
- ✓ **Coffee Paper** es un papel fabricado en Tailandia que consiste en un 30% de los residuos de café molido, 40% fibra de morera y 30% fibra de celulosa reciclada. Las aguas residuales utilizadas durante el proceso también se utilizan como fertilizante. El papel es biodegradable, compostable, no tóxico y libre de ácidos (foto 6b).

Figura 6 - *a) Trajes de surf de Yulex; b) Papel biodegradable*.

- ✓ **"Bioladrillos"** son bloques prefabricados de un biocompuesto de cáñamo y cal utilizados para la fabricación de ladrillos y capas de fondo para aislamiento térmico. (Asaro, 2012) (foto 7a).
- ✓ **Plant Fiber Blend** es un material fibroso de bagazo, bambú y tallos de grano, utilizado para la fabricación de envases y embalajes alimentarios (foto 7b).

Figura 7 - *a) Bioladrillos en cáñamo y cal ; b) Embalajes alimentarios vegetales*.

Las impresoras 3D permiten hacer objetos pequeños y grandes a bajo coste, eligiendo materiales y formas. Con el uso de neomateriales nacen entonces:

- ✓ **Timberfill** (Fig. 8a), un filamento de impresión 3D totalmente biodegradable fabricado en PLA, que contiene polvo de madera de abeto. Los objetos impresos con Timberfill tienen el aspecto, la consistencia y las propiedades acústicas de la madera auténtica
- ✓ **Módulo de anclaje biodegradable** (Fig. 8b) diseñado y fabricado por Biosurvey Srl en colaboración con IDEA Srl, que consiste en un sistema modular innovador en el campo de la reforestación de ambientes marinos degradados. La estructura está hecha enteramente de material bioplástico (Mater-Bi) (Calvo *et al*., 2014).

Figura 8 - *a) Timberfill el filamento de impresión 3D in PLA; b) Módulo de anclaje en Mater-Bi*.

Residuos de poda de vid

La vid es una planta arbustiva perteneciente a la familia de las Vitáceas, clasificada en el género *Vitis*, que se divide en dos subgéneros: *Muscadinia y Euvitis*.

En el subgénero *Muscadinia* sólo se distinguen tres especies: *Vitis rotundifolia (*Michx), var. *munsoniana* y *Vitis popenoi* J. L. Fennel. El subgénero *Euvitis* incluye numerosas especies, divididas principalmente en función del área de origen: europea, americana y asiática.

Entre las viñas europeas se encuentra *Vitis vinifera* (Linnaeus) que a su vez se divide en: *V. vinifera silvestris* (selvatica, dioica, racimos, bayas pequeñas y ácidas), *V. vinifera sativa* que incluye todas las viñas cultivadas. *V. vinifera* es una especie arbustiva de aspecto lianoso que puede alcanzar dimensiones considerables si no está sostenida por tutores y sometida a poda anual (Eynard, 2005).

El ciclo anual de la *V. vinífera* se divide en: periodo de reposo invernal (de noviembre a abril en el hemisferio norte) y fase vegetativa-productiva (de mayo a noviembre); los períodos varían según las condiciones edafoclimáticas, latitud y características de la variedad.

Italia, primera productora mundial de vino (Coldiretti, 2012), se caracteriza por una gran superficie plantada de 669.108 ha, de las cuales 118.826 están presentes en Sicilia (Agri Istat, 2017). El 80% de la superficie cultivada está presente en las provincias de Trapani (54%), Agrigento (18%) y Palermo (13%), mientras que el 58% de los viñedos se encuentran en las colinas, el 38% en la llanura y el 4% restante en las montañas (Istat, 2010).

Cada año durante el invierno, la poda de las viñas produce una gran cantidad de residuos (sarmientos) que, para muchos viticultores, son residuos que deben eliminarse. Además de la quema clásica (D.lgs. 91 de 24/06/2014), las técnicas alternativas para la gestión de los sarmientos adoptadas, o en evaluación por los empresarios, son las siguientes:

a) la reutilización en el campo de los residuos como materia orgánica mediante trituración y enterramiento *in situ*;
b) la producción de calor o energía mediante máquinas especializadas.
Estas prácticas presentan inconvenientes que no deben subestimarse. La quema, por el modo directo en que se realiza, representa el procedimiento más contaminante, además de ser un elemento de riesgo en la propagación intencional del fuego en las superficies forestales.

La reutilización en el campo podría facilitar la difusión de posibles inoculaciones presentes en la madera como necrosis radicales. En estas circunstancias, debe evitarse la dispersión de los sarmientos, ya que el patógeno encuentra en el suelo un entorno favorable para invernar y volver a

infectar en la primavera siguiente, lo que podría contaminar las plantas sanas. En cualquier caso, la producción de energía provoca un aumento de las emisiones atmosféricas (en particular de CO_2) y una serie de costes adicionales para el proceso de transformación, también muy altos.

Residuos de *Posidonia oceanica*

Posidonia oceanica es una fanerógama marina endémica del mar Mediterráneo. En el litoral forma extensas praderas desde las zonas más someras hasta una profundidad variable, en función del límite al que la intensidad lumínica permite su función fotosintética (Borg y Schrembi, 1995). Como el resto de las fanerógamas, presenta hojas, raíces, tallo o rizoma, flores y frutos (Fig. 9). Florece en otoño, y en primavera, produce frutos comúnmente llamados "aceitunas de mar".

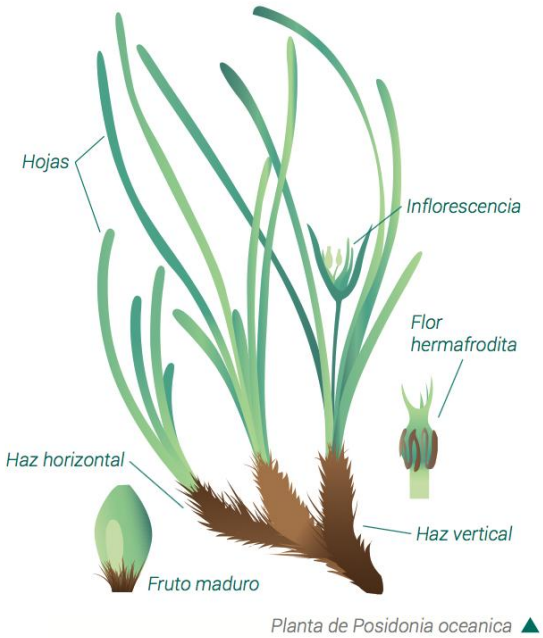

Figura 9 *– Esqueje de P. Oceánica (Fuente: Guía de buenas prácticas para la gestión, recogida y tratamiento de los arribazones de algas y plantas marinas en las costas. Proyecto Seamatter LIFE11).*

Si bien el modo principal de reproducción es por vía sexual, también es asexual, lo que ocurre cuando se produce el desprendimiento de parte de los rizomas (Den Hartog, 1970). Cuando *P. oceanica* encuentra condiciones ambientales favorables, coloniza vastas áreas formando extensas praderas, caracterizadas por una densidad variable, normalmente decreciente a medida que aumenta la profundidad. Las praderas se extienden desde la superficie hasta los 30-35 metros de profundidad, llegando a veces hasta los 40-50 metros en aguas particularmente cristalinas (Borg y Schrembi, 1995). Se estima que las praderas de *P. oceanica* en el Mediterráneo ocupan una superficie de 2.5 - 5 millones de hectáreas (Pasqualini *et al*., 1998).

La importancia de las praderas de *P. oceanica*, se debe a que es uno de los ecosistemas marinos más productivos del planeta, son fuente directa o indirecta de alimento ya que sobre sus hojas crece una gran variedad de organismos (Battiato *et al*., 1982). Además, para muchos animales sirven de refugio, lugar para la freza y cría, también de considerable importancia económica (Francour, 1997).

Es bien sabido que las praderas de *P. oceanica* son uno de los componentes fundamentales del equilibrio y la riqueza del entorno costero mediterráneo. Juega un papel muy importante como polo de biodiversidad, ya que acoge cerca del 25% de todas las especies presentes en el Mediterráneo. Se caracterizan por una alta producción de oxígeno, una alta biomasa vegetal y uno de los niveles de producción primaria más altos del mundo para el medio ambiente marino (Pergent *et al*., 1995; Pergent-Martini, 1994). Una parte considerable de esta producción primaria, del 25% al 85%, se exporta en forma de hojas muertas a otros tipos de fondos (Boudouresque *et al*., 2006), representando un recurso alimentario de gran importancia.

La sustancia orgánica producida, es una fuente directa e indirecta de alimentos para muchos organismos, así como la base de una compleja red trófica (Mazzella *et al*., 1992). Parte de las hojas que se desprenden de las plantas de *P. oceanica* se reciclan en la propia comunidad de la pradera, otra parte se exporta, bien hacia zonas más profundas, o bien hacia la costa donde llega a la orilla. Las acumulaciones de hojas y restos de la fanerógama marina se encuentran comúnmente a lo largo de las costas mediterráneas, formando en las orillas unas estructuras, llamadas "*banquettes*" cuya principal composición son hojas, rizomas y sedimentos (Fig. 10). Las "*banquettes*" van desde unos pocos centímetros a 4-5 metros de altura y se desarrollan para miles de metros, dependiendo de la estructura geomorfológica de la costa (Boudouresque y Meinesz, 1982). Las *"bolas de Posidonia"* tienen una forma singular que se puede ver fácilmente en la orilla de la playa. Estas, están formadas por conglomerados compuestos por fibras procedentes de los rizomas de haces, junto con granos de arena. Adoptan esta forma esférica debido al efecto de vaivén provocado por el movimiento circular de las olas en la zona de rompiente de las playas (Guillén, 2014). Fenómeno natural que se observa anualmente en la costa, especialmente después de las marejadas de otoño e invierno.

Figura 10 *– Proceso de formación de una banquette*. *(*Fuente: Guía de buenas prácticas para la gestión, recogida y tratamiento de los arribazones de algas y plantas marinas en las costas. Proyecto Seamatter LIFE11).

Esta alta producción se manifiesta en su desarrollo foliar, uno de los más elevados del mundo, el cual debido a la gran colonización de algas y pequeños animales, debe ser repuesto de forma continua. Esta biomasa tiene una importancia considerable cuando se acumula en las playas como residuo, tanto para limitar la erosión costera como para favorecer la formación del sistema dunar (Boudouresque *et al*., 2006).

Sin embargo, a pesar del reconocido papel ecológico que cumplen las fanerógamas marinas, en el mar (en forma de praderas) o en la playa (*banquette*), el varamiento de los residuos se percibe con malestar por la gente, los nadadores y los establecimientos del turismo litoral. Por esta razón, se requiere a los gobiernos locales, de eliminar los residuos de *P.oceanica* de las playas cada año. En este ámbito, proyectos de investigación europeos e internacionales (*PRIME "Posidonia residues integrated management for eco-sustainability"* Life+ EU; *MEDCOT* "*Métodhologies Durable pour la Rehabilitation et la Valorisation du Littoral Côtier*" Programa ENPI Italia-Tunisia 2007 EU) están desarrollando prácticas de reutilización de los residuos como fertilizante y como compost en la agricultura.

Usos de los residuos de *Posidonia oceanica*

El uso de la biomasa vegetal varada viene de la antigüedad, como material de construcción, material de embalaje, relleno de colchones, etc. Hoy en día, la investigación científica estudia el potencial de estos materiales para la producción de energía, obras de restauración de dunas, diseño y productos cosméticos (Parente *et al*., 2009).

En la agricultura, todavía se utiliza como mejorador del suelo, alimento para el ganado y para la producción de compost. El uso de estos residuos comienza desde tiempos prehistóricos, las hojas de *P. oceanica* una vez secas se utilizaban como lecho (De Lumeley *et al.,* 1969). Incluso los antiguos egipcios usaban residuos de plantas varadas para producir zapatos (Tackolom y Drar, 1954). Además las hojas de *P. oceanica* se utilizan para aislar los techos (Bouderesque y Meinesz, 1982), particularmente a lo largo de las costas del norte de África, en el sur de España y en las Islas Baleares (Terrados *et al.,* 2004). Las hojas también se utilizan en el campo de la construcción, en Libia para hacer muros y pozos (Trotter, 1915), en el sureste de España y en las Islas Baleares, para la producción de ladrillos (Terrados, 2004). Sus propiedades fono y termo absorbentes de las hojas de *P. oceanica*, junto con su baja densidad y alta porosidad (Milchakova, 2014) han permitido su uso como aislante térmico en Grecia (Sordina, 1951). Además también se estableció su uso como material de embalaje para objetos de vidrio (Bouderesque y Meinesz, 1982) llamado por esta razón también "paja de Venecia" o "alga de vidrieros" en Italia. También su utilización para la producción de papel (McRoy y Helfferich ,1980) y compost en la agricultura (Cocozza *et al.,* 2009; Parente *et al.,* 2009; Mininni *et al.,* 2015; Montesano *et al.,* 2014). Por último, la empresa griega *Phee* ha patentado y comercializado productos fabricados con residuos de *P.oceanica* como fundas para teléfonos móviles, cajas y raquetas de playa (Fig. 11).

Figura 11 - *Productos fabricados con residuos de P.oceanica de la empresa Phee.*

Normativa de referencia

La conservación y valorización de las praderas de *P. oceanica* está establecida por leyes nacionales, directivas europeas y convenios internacionales.

A nivel de pradera, *P. oceanica* está protegida en virtud de la Directiva Hábitats 1992/43/CEE (transpuesta en Italia por el D.P.R. 357/1997 y sus modificaciones) como tipo de hábitat prioritario. La presencia de praderas de *P. oceanica* implica el establecimiento de Lugares de Importancia

Comunitaria (LIC) que, junto con las Zonas de Especial Protección para las Aves (ZEPA), constituyen los Lugares de la Red Natura 2000, una red de espacios naturales protegidos, establecida por la Comunidad Europea, con el objetivo de proteger el estado de conservación de las especies de flora y fauna y los tipos de hábitat que necesitan acciones de protección específicas.

Desde el punto de vista normativo falta en Italia una ley orgánica o un reglamento que proporcione una orientación clara sobre la gestión de la biomasa varada. La Ley 152/2006 es la normativa italiana de referencia para la gestión de la biomasa marina, que identifica los residuos en las playas como residuos sólidos urbanos; la Circular 8123/2006, emitida por el Ministerio de Medio Ambiente y de la Protección del Territorio y del Mar, propone tres posibles estrategias en caso de conflicto con el uso de las playas para el turismo, incluyendo además la eliminación de los residuos en vertedero. La circular 35792/2009, emitida por la Región de Sicilia, ofrece una posibilidad adicional de gestión que es la reutilización de la biomasa para las medidas de restauración ambiental y paisajística en la zona costera o como compost en la agricultura (Decreto Ley no 75/2010 "Reorganización y revisión de la disciplina de fertilizantes", con respecto al artículo 13 de la Ley no 88, de 7 de julio de 2009).

Métodos

Residuos de poda de vid

Área de muestreo

La primera empresa vinícola identificada para el muestreo de los sarmientos es la Tenuta Marino Feudo di Montagnola con sede en Camporeale, provincia de Palermo (37°51'01.61 "N; 13°06'43.89" E) (Fig. 12).

Figura 12 - *Empresa vinícola Tenuta Feudo di Montagnola.*

La propiedad, situada entre 200 y 450 m sobre el nivel del mar, utiliza exclusivamente métodos de agricultura ecológica. Fundada en 1970, tiene una superficie de 100 ha de viñedo. La producción ganadera utiliza sistemas de hileras en forma de muro que se desarrollan verticalmente, con un espesor transversal limitado. Las instalaciones de producción están representadas por brotes de un año.

La empresa vinícola Corbera en Contrada Isabella (37°42’07.48” N; 12°59’54.64”E), la segunda viña, está situada en el municipio de Santa Margherita di Belice, a unos 350 metros sobre el nivel del mar. El suelo es de masa mediana con tendencia a la caliza. Los viñedos están expuestos al suroeste, el clima es mediterráneo con buenas variaciones térmicas entre el día y la noche.

Los sarmientos recién podados de los cultivares, Cabernet y Catarratto fueron llevados y transportados al Departamento de Ciencias Agrícolas, Alimentarias y Forestales de la Universidad de Palermo (Fig. 13).

Figura 13 - *Sarmientos recién podados de Cabernet.*

La tercera empresa vinícola seleccionada, Alto Belice di S. Cipirriello en la provincia de Palermo (37°57'34.17 "N; 13°10'36.81" E), proporcionó muestras de siete cultivares: Cabernet, Inzolia, Nero d' Avola, Grecanico, Grillo, Chardonnay y Sirah (Fig. 14).

Figura 14 - *Vista de la viña Alto Belice.*

A continuación se presentan las características del viñedo y los métodos de cultivo divididos por variedades (Tabla 1).

Tabla 1 - *Características de sarmientos y viñedos de origen.*

VARIEDAD	CONTRADA	EDAD	FERTILIZACIÓN	IRRIGACIÓN
Nero d'Avola	Perciana	20	si	si
Cabernet	Perciana	16	si	si
Chardonnay	Perciana	13	si	si
Syrah	Perciana	19	si	si
Inzolia	Feotto	7	si	si
Grillo	Feotto	7	no	no
Grecanico	Feotto	9	no	no

La empresa vinícola Barbera (37°35'22.48 "N; 12°56'05.17") situada en el distrito de Torrenova, Menfi, en provincia de Agrigento, proporcionó muestras de los sarmientos del cultivar Catarratto.

Instrumentación

Se utilizaron los siguientes instrumentos para realizar las pruebas:

1. Dinamómetro digital FH500 Sauter FH Digital con célula de carga 500 N y resolución 0.1 N, montado en un banco de pruebas Sauter TVM-N motorizado. El instrumento se conecta, por medio de un ordenador, al software AFH-01 versión 1.0.8.6 (Fig. 15);
2. Termohigrómetro PCE-313S que determina la humedad relativa y la temperatura en contacto con el material;
3. Calibre con dos decimales para la medición de diámetros de muestra.

Figura 15 - *Instrumentación utilizada para ensayos mecánicos.*

Características medias de sarmientos y fajinas

Los sarmientos de los cultivares Catarratto y Cabernet, almacenados primero en el campo experimental del Departamento de Hidráulica, fueron embalados en forma de fajinas (D'Asaro y Calvo, 2017) (Fig. 16) y luego puestos en la instalación experimental de campo identificada en el cercano Parco d' Orleans.

Figura 16 - *Montaje manual de fajinas con manta de yute.*

Se embalaron un total de 14 fajinas, 7 con sarmientos de Cabernet y 7 con sarmientos de Catarratto. En las fajinas se midieron

- La longitud (m);
- El diámetro medio (m);
- El peso (kg);
- El volumen aparente (m^3);
- La porosidad media (%);
- La bulk density (kg/m^3).

Ensayos de resistencia mecánica

Se seleccionaron muestras de sarmiento de cultivares Cabernet, Inzolia, Nero d' Avola, Grecanico, Grillo, Chardonnay y Sirah, con una longitud de L=10 cm y humedad "normal" (12%), con el criterio de: ausencia de nudos e imperfecciones, uniformidad de diámetro y eje longitudinal rectilíneo (cilíndrico). La durabilidad abiótica (mecánica) de los sarmientos (D' Asaro y Calvo,

2017), fue posteriormente estimada mediante ensayos de resistencia a la flexión y medición de la tensión de rotura.

Bajo la hipótesis de validez de la ley de Hook, se realizaron ensayos de resistencia a la flexión de acuerdo con el modelo a tres puntos (3 point bending test) hasta la rotura de las fibras inferiores de las muestras, lo que permitió obtener el módulo de elasticidad longitudinal E (a lo largo de las fibras) y la tensión de rotura σ, sobre la base del diagrama tensión/deformación (F/δ) y la fuerza de rotura F_{max}. Para la sección circular de radio R (promedio de las mediciones en 3 secciones) las fórmulas para la evaluación de E y σ son los siguientes:

$$E = \frac{F}{\delta}\frac{L^3}{12\,\pi\,R^2}\,; \quad \sigma = \frac{F_{max}\;L}{\pi\,R^3} \qquad (1)$$

Se analizaron 122 muestras con un número de 14 a 21 muestras por cultivar.

Los ensayos se llevaron a cabo aplicando una carga vertical sobre una muestra colocada en los extremos y sin limitaciones, sobre un soporte de sección rectangular, a velocidad constante hasta que la muestra se rompió (Fig. 17).

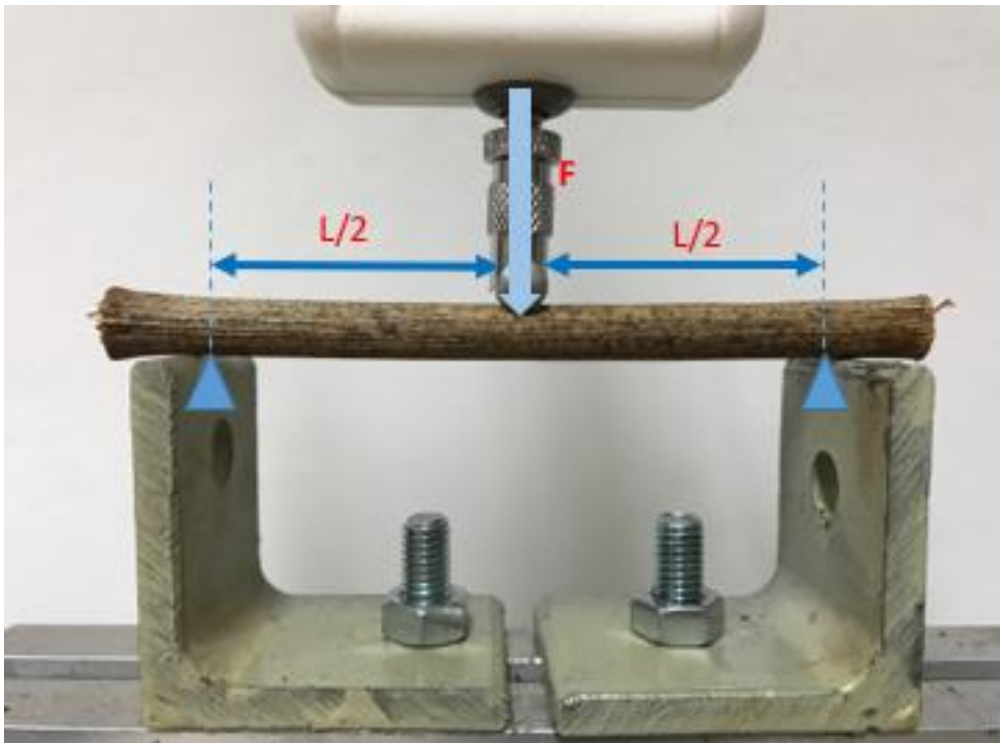

Figura 17 - *Ejemplo de un ensayo de resistencia a flexión a tres puntos realizado en una muestra de sarmientos.*

Debido al efecto de la carga concentrada aplicada, la probeta se flexiona y las fibras longitudinales son parcialmente comprimidas (más altas) y parcialmente tensadas (inferiores).

La velocidad estándar elegida para todas las pruebas y muestras analizadas fue de 7 mm/min. El software conectado a la máquina de prueba devuelve y grafica las mediciones de la fuerza aplicada y el desplazamiento relativo (Flecha) (Fig. 18).

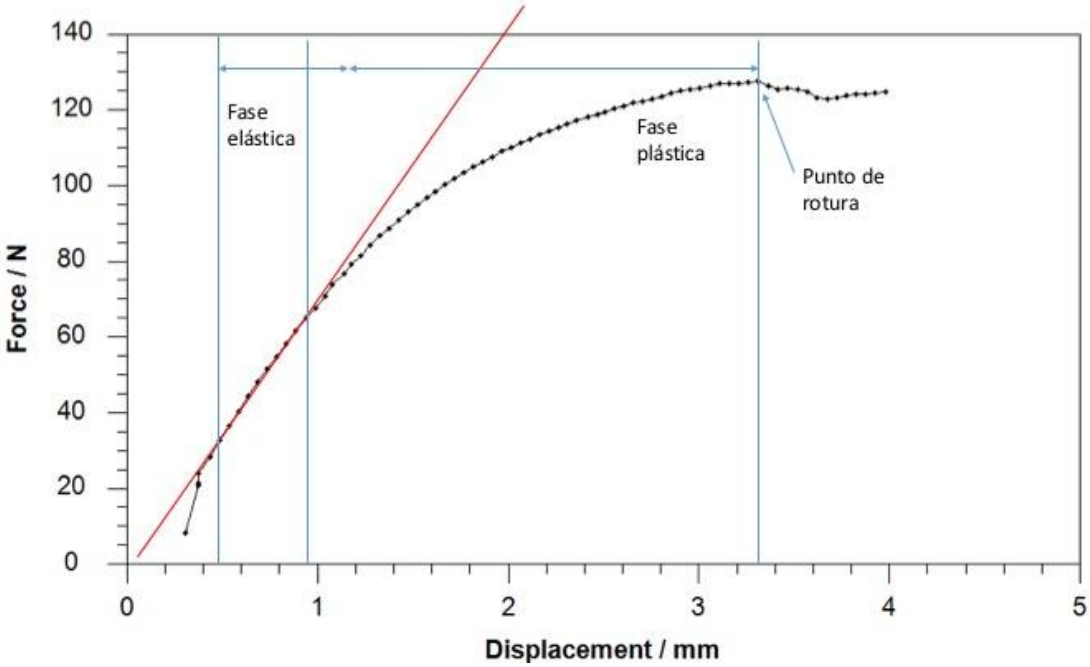

Figura 18 - *Ejemplo de ensayos de resistencia a la flexión en una muestra de sarmiento.*

Residuos de *Posidonia oceanica*

Área de muestreo

El muestreo de los residuos de *P. oceanica* se efectuó en Custonaci, provincia de Trapani caracterizada por altos valores de cobertura y producción primaria de la pradera en el área (Calvo *et al*., 2010).

La *banquette* de la que se han tomado los residuos tiene una altura de 4 m y se extiende unos cientos metros a lo largo de la costa rocosa detrás del Monte Cofano (Tp) (Fig. 19).

Figura 19 - *Área de muestreo de los residuos de P. oceanica.*

Los residuos de *P. oceanica* se tomaron mecánicamente, después del tamizado, y se depositaron en el parque Sub urbano de Custonaci. En el ámbito de un proyecto de restauración del parque, mediante técnicas de Bioingeniería Paisajística, se ha creado un emplazamiento para el almacenamiento de los residuos, en colaboración con el Director de Obras, Ing. Pirrera.

Figura 20 - *Sitio de almacenamiento*.

El sitio de almacenamiento (Fig.20) tiene un tamaño de 25x25 m y está formado por una malla metálica y una manta impermeable en la base para limitar la infiltración en el suelo.

Se han sacado un total de 900 metros cuadrados de residuos de *P. oceanica*, de los cuales, 300 metros cuadrados en septiembre de 2014 y 600 metros cuadrados en noviembre de 2015.

Los residuos se depositaron durante 13 meses en el lugar de almacenamiento para permitir la pérdida natural de sales bajo la lluvia. La precipitación media anual de la cercana estación pluviográfica de S. Vito Lo Capo es de 474 mm. Después de este tiempo, fueron transportados al Laboratorio de Hidrología del Departamento de Ciencias Agrícolas, Alimentarias y Forestales para su análisis y control.

Instrumentación

Para efectuar ensayos sobre los residuos de *P. oceanica* se han utilizado los siguientes instrumentos:

1. Sonda multiparamétrica Hanna instrument HI98192: Equipada con una sonda de conductividad HI763133 de cuatro circuitos con sensor de temperatura integrado. La sonda mide la conductividad aplicando una tensión entre dos electrodos y calcula la resistencia de la solución. El instrumento está equipado con una escala de conductividad extendida de

0.000 µS/cm a 1000 mS/cm (conductividad real; con compensación de temperatura hasta 400 mS/cm), una escala TDS, una para resistividad y tres escalas para salinidad.

2. Hanna instrument Phmeter Combo HI 98129: El instrumento de bolsillo está diseñado para obtener mediciones precisas de pH, EC/TDS y temperatura.
3. Simulador de lluvia: 200 mm de diámetro con 48 dispensadores de agujas.
4. Frasco de Mariotte: compuesta por un depósito con tapa, un pequeño tubo sumergido en el líquido que permite la entrada de aire y un sifón. La presión a la salida de la tubería de mando es siempre la misma, la presión atmosférica.
5. Agitador magnético: utilizado para mezclar eficientemente y sin la ayuda de múltiples varillas y agitadores externos al mismo tiempo, girando un gancho magnético en la parte inferior de un recipiente sobre el que actúa un campo magnético.
6. Registrador de datos Hobo data logger: registrador de datos en miniatura de temperatura e intensidad luminosa. Con cubierta impermeable, este producto está diseñado para su uso en ambientes interiores, exteriores y subacuáticos. El modelo utilizado puede almacenar aproximadamente 52.000 mediciones de lecturas de 10 bits.

Medidas de salinidad

Para evaluar la reducción de la salinidad mediante un proceso de lavaje a presión constante de los residuos de *P. oceanica* recién varados y de los residuos depositados en el lugar de almacenamiento, se realizaron pruebas de escorrentía en cilindro (Fig. 21) con una cantidad total de agua de 2.5 L, igual a diez veces el peso del material tratado (250 ml).

Durante el ensayo, se midieron los valores de pH y conductividad eléctrica (CE) de las muestras de agua de drenaje progresivamente saliente e igual al peso del material tratado (250 ml), asumidos como "lavaje unitario".

Se realizó otro análisis de salinidad utilizando el método estándar (Violante, 2000) con dilución 1:20. La muestra se agitó mecánicamente durante dos horas y se dejó en reposo durante una noche. A continuación, se filtró en un filtro de papel Whatman® nº42. En el filtrado se midieron valores de conductividad eléctrica (CE), sólidos disueltos totales TDS, porcentaje de sales presentes y pH (Fig. 21).

Figura 21 - *Proceso de lavaje y análisis de la salinidad de los residuos de P. oceanica.*

Medidas de densidad

Las mediciones de masa se realizaron con un picnómetro:

- Peso de los residuos de *P. oceanica*, (masa m1).
- Peso del picnómetro lleno de agua hasta la marca del afloramiento junto con los residuos de *P. oceanica*, (masa m2).
- Peso de los residuos de *P. oceanica* dentro del picnómetro, llevando el nivel del agua al afloramiento, (masa m3).

Se ha aplicado la fórmula de la densidad relativa:

$$\delta_{rel} = \frac{m1}{m2 - m3} \qquad (2)$$

Y multiplicando el valor obtenido por la densidad absoluta del agua a temperatura ambiente, se obtiene una estimación de la densidad absoluta de la muestra.
La porosidad P, viene dada por la relación entre densidad absoluta D y densidad aparente D', según la fórmula:

$$P = \frac{D - D'}{D} *_{100} \qquad (3)$$

La *Bulk density* o densidad aparente se obtiene de la relación entre el peso seco y el volumen de muestra. Se han incluido los espacios ocupados por los poros de los que se ha eliminado el agua, pasando por una estufa de laboratorio las muestras a 105° C.

Caracterización hidrológica de los residuos de *Posidonia oceanica*

Las muestras de residuos de Posidonia, preparadas en el laboratorio con una densidad aparente igual a la medida en las muestras no perturbadas en el lugar de almacenamiento, se colocaron en anillos metálicos de diámetro, D = 200 mm (Fig. 22a), drenados libremente en el fondo, cerrados con tela no tejida y malla metálica de contención.

La altura H de las muestras se fijó en 200 mm. Los volúmenes drenados, resultantes de las precipitaciones aplicadas en la parte superior de la muestra, se recogieron en un fondo de tolva y se

pesaron. A continuación, las pruebas de infiltración se realizaron utilizando un simulador de lluvia con un diámetro igual al de los anillos (Fig. 22b).

El simulador, equipado con 48 dispensadores de agujas, fue alimentado con el frasco de Mariotte, capaz de reproducir la intensidad de la lluvia, variable linealmente con la carga H, según la calibración mostrada en la Fig. 22c. Las pruebas se realizaron con una intensidad de lluvia constante de 50 mm/h (Fig. 22c), correspondiente a la carga sobre la sección terminal de las agujas (h = 43.8 cm).

Las mediciones de conductividad hidráulica saturada, realizadas sobre muestras de tamaño menor (85 x 100 mm) y medidas de densidad absoluta del material ρ_s, realizadas con picnómetro, proporcionaron las características físicas medias en las que $\theta_s = 1- \rho_b/\rho_s$.

El objetivo de las pruebas fue estudiar el proceso de infiltración por el efecto de la condición de humedad inicial sobre el tiempo de retraso td, el tiempo necesario para que el frente de humedad, a partir del inicio del evento lluvioso, llegue a la base del cúmulo. Para no introducir variabilidad en las características físicas del material a causa de la preparación en laboratorio de varias muestras en diferentes condiciones iniciales, se realizaron sucesivamente los ensayos sobre la misma muestra, aplicando en cada ensayo un volumen de lluvia, Vp, igual a 500 ml (Vp = 13.9 mm).

De esta forma, las condiciones de humedad iniciales de cada prueba correspondieron con las condiciones finales de la prueba anterior. Para cada prueba se midió lo siguiente:

1. El tiempo de retardo td, identificado por el tiempo transcurrido entre el inicio de la lluvia y el primer goteo en la base de la muestra;
2. El volumen escurrido al final de la lluvia $V_{d, FP}$;
3. El volumen total drenado V_d, medido cuando el goteo se ha detenido;
4. La condición inicial de humedad Θ_0, obtenida del peso inicial de la muestra P_0 (g), de acuerdo con $\Theta_0 = (P_0 - P_s)/(\rho_w\ A\ H)$, donde P_s (g) es el peso seco, A (mm^2) la superficie de la muestra, $\rho_w = 0.001$ (g mm-3) la densidad del agua y H (mm) la altura de la muestra;
5. El contenido inicial de agua de cada ensayo, incluso el volumen drenado V_d, añadiendo al contenido inicial de agua de la prueba anterior el contenido de agua $\Delta\Theta$, obtenido por la diferencia entre el volumen de lluvia aplicado y el volumen drenado en la prueba anterior $\Theta_{0,VD} = \Theta_{0,i-1} + \Delta\Theta$.

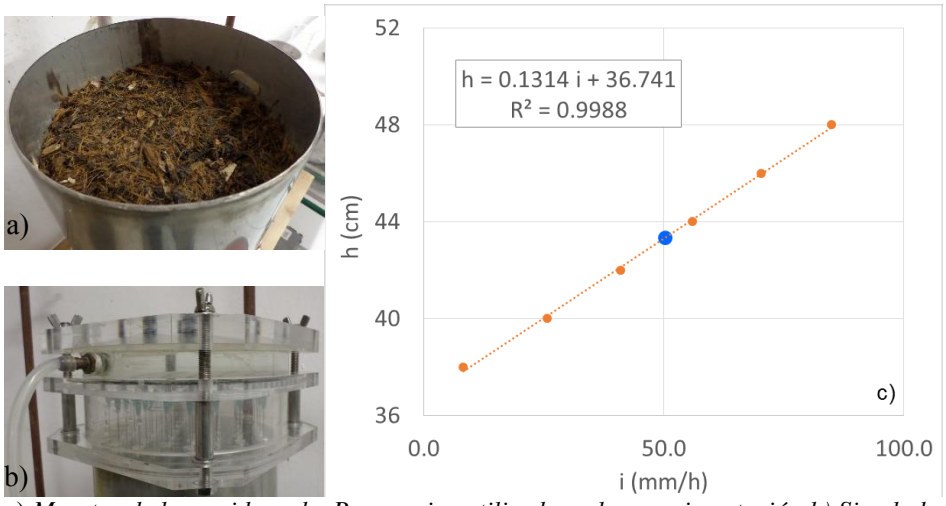

Figura 22 - a) *Muestra de los residuos de P. oceanica utilizada en la experimentación b) Simulador de lluvia c) Informe de calibración relativa de la intensidad de la lluvia.*

Material vegetal

Áreas de muestreo

El muestreo de especies vegetales autóctonas, para hacer de las fajinas experimentales un sistema vivo, se realizó en 5 estaciones diferentes de la provincia de Palermo (Fig. 23).

Figura 23 - *Identificación de las zonas de muestreo*.

En particular:

- Muestras *Ampelodesmos mauritanicus* (Poir.) T. Durand & Schinz, *Oryzopsis* miliacea (Linnaeus) Asch. & Schweinf., *Hedysarum coronarium* (Linnaeus) Medik, *Medicago lupulina* (Linnaeus), *Lygeum spartum* (Linnaeus), *Brachypodium distachyon* (Linnaeus) P. Beauv procedentes de Termini Imerese (PA).
- Muestras de *Rosmarinus officinalis* (Linnaeus), tallo erecto y procumbentes, procedentes del Parco d' Orleans de la Universidad de Palermo.
- Muestras de *Ampelodesmos mauritanicus*, *Rhus coriaria* (Linnaeus) procedentes de Monreale (Pa).

- Muestras de *Spartium junceum* (Linnaeus), procedentes de las estaciones de Monreale, Collesano y Castelbuono.

En los últimos muestreo, también se hizo una distinción entre plantas de la misma especie procedentes de la posición de plano y con una pendiente de 22°- 28°- 40° (Calvo *et al*., 2017).

En el antiguo vertedero de S. Marina de Termini Imerese (37°58'58.36 "N, 13°40'14.62" E ; Fig. 24) se tomaron un total de 19 muestras de diferentes especies, subdivididas de la siguiente manera:

- *M. lupulina* (5 muestras)
- *L. spartum* (2 muestras)
- *H. coronarium* (3 muestras)
- *O. miliacea* (5 muestras)
- *A. mauritanicus* (3 muestras)
- *B. distachyon* (1 muestra)

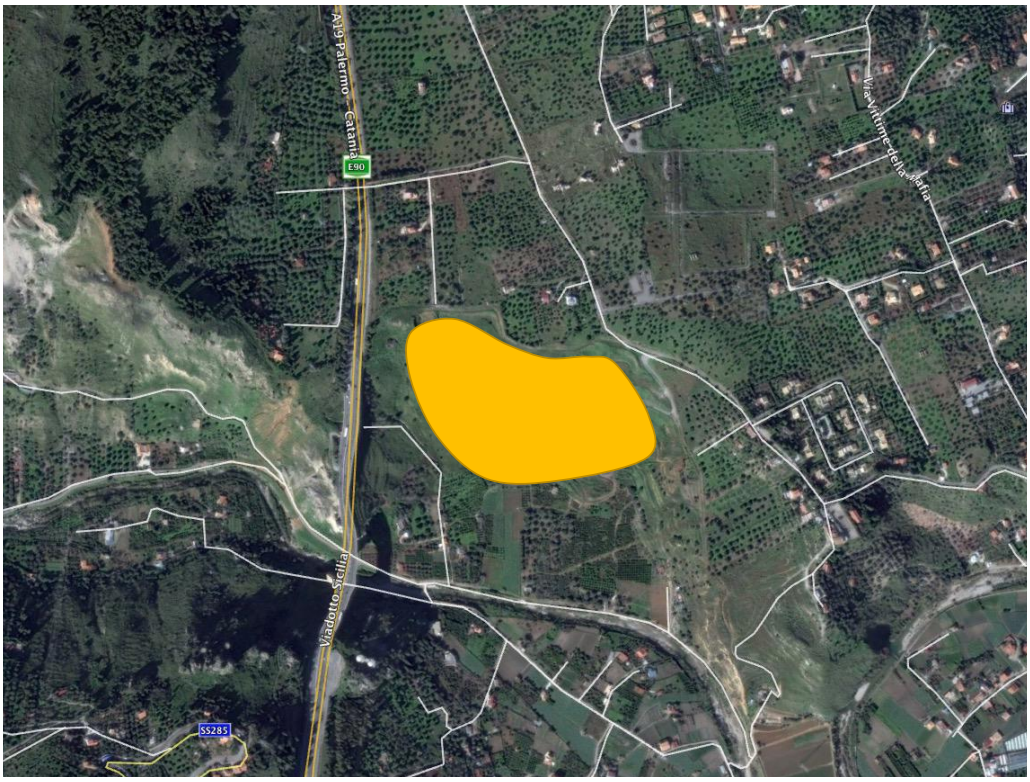

Figura 24 - *Muestreo en el antiguo vertedero de S. Marina de Termini Imerese.*

El muestreo de la especie se efectuó durante la realización de un proyecto con el objetivo de mejorar el área degradada, con la ayuda de técnicas de Bioingeniería del Paisaje para la recalificación del área degradada (Pirrera *et al*., 2016).

En el Parco d' Orleans de la Universidad de Palermo (38°06'26.2 "N 13°20'56.0" E; Fig. 25) se tomaron dos muestras de *R. officinalis* de diferentes edades (12 y 18 años). El suelo en la zona de extracción es arcilloso - arenoso (Tuttolomondo *et al*., 2017).

Durante el ensayo, el tratamiento agronómico preveía sólo en los primeros meses de plantación, dos irrigaciones de emergencia y el control manual de las malas hierbas.

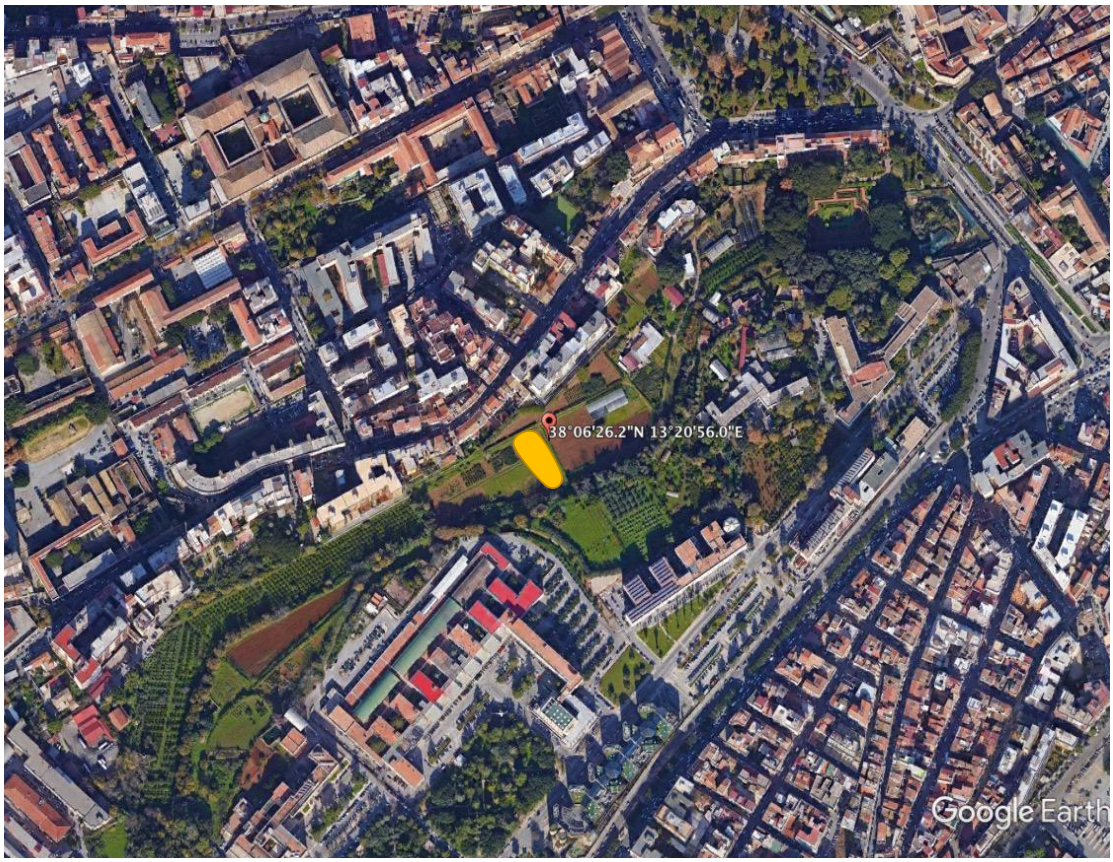

Figura 25 - *Muestreo en el Parco d' Orleans de la Universidad de Palermo*.

En la estación de Monreale (38°02'07.89"N;13°09'52.28"E – 38°01'59.86"N; 13°10'49.44"E – 38°01'43.43"N; 38°10'36.60"E; Fig. 26) se recogieron 24 muestras, 8 para cada especie y, dentro de la misma especie, se decidió la toma de 4 muestras de terreno en posición de plano y 4 muestras de terreno en posición de pendiente de 22°. Se realizaron muestreos semanales y se recogieron un promedio de cuatro muestras a la vez durante cada visita de campo. Las muestras se tomaron de tres zonas diferentes, todas ubicadas en el distrito de Mirto (Monreale) en suelos de textura arcillosa o franco-arcillosa.

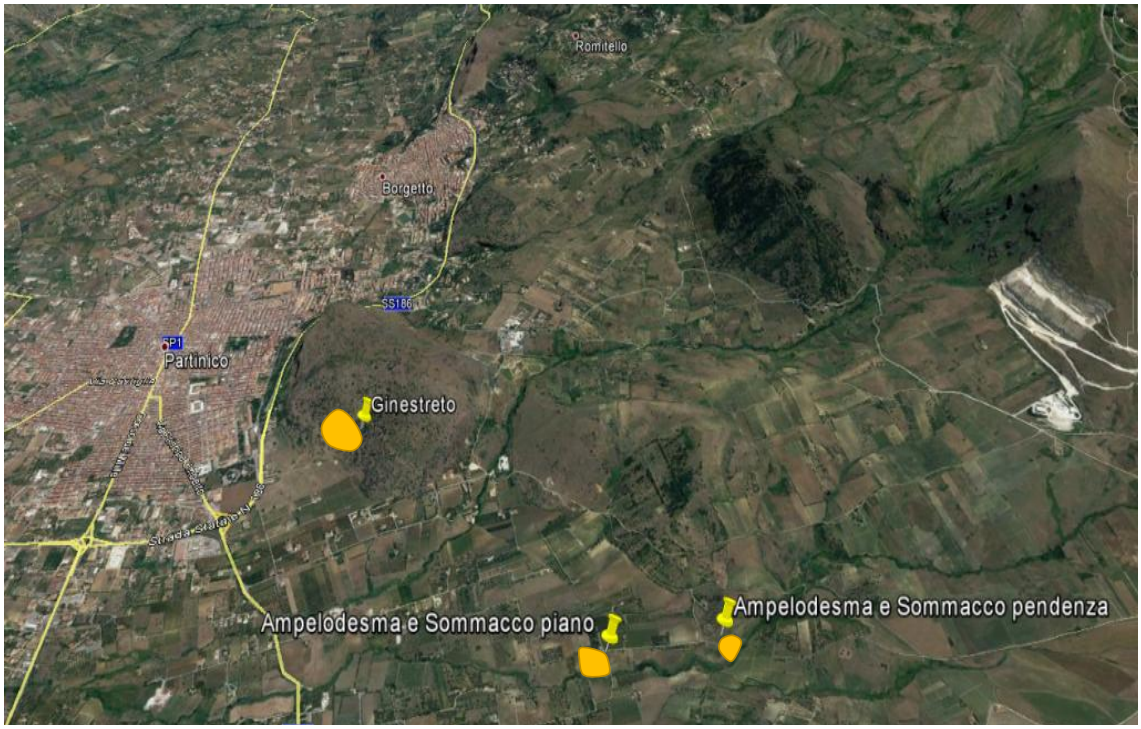

Figura 26 *– Muestreo en el distrito de Mirto en Monreale.*

En las dos estaciones de Castelbuono (37°58'30.21 "N; 18°53'42.06" E - 37°56'7.15 "N; 14°04'22.50" E; Fig. 27) se muestrearon 9 plantas de *S. junceum* de suelos arcillosos, de las cuales 3 con una pendiente de 41° y 6 en posición de plano. El muestreo se realizó en un día.

Figura 27 - *Muestreo en la estación de Castelbuono.*

En la estación de Collesano (37°58'30.21 "N; 18°53'42.06" E; Fig. 28) se tomaron 5 muestras de *S. junceum*, de las cuales 2 con una pendiente de 28° y 3 en posición de plano con textura de suelo franco.

Figura 28 *– Muestreo en la estación de Collesano.*

Protocolo para la extracción de especies vegetales

La extracción de las especies vegetales se ha realizado de forma manual o mecánica en el caso de muestras más desarrolladas en la parte radicular (Fig. 29), trabajando con excavaciones por sondeo alrededor de la planta para causar el menor daño posible a las raíces.

Figura 29 - *Extracción mediante excavación manual y por medios mecánicos de A. mauritanicus.*

Una vez alcanzada la profundidad radicular libre de raíces, el terrón fue aislado (Fig. 30), separado y medido.

Figura 30 - *Extracción del terrón de suelo en R. officinalis.*

Los bloques de tierra – raíces han sido liberados del suelo por agitación y lavado a presión, teniendo cuidado de no dañar el sistema radicular (Fig. 31). En el laboratorio, se realizó un lavado de acabado y un control de integridad de la muestra antes de las mediciones.

Figura 31 - *Lavado del sistema radicular R. officinalis en el campo.*

Instrumentación

Se han utilizado los siguientes equipos para analizar las especies vegetales muestreadas:

1. Dinamómetro digital FH500 Sauter FH Digital con célula de carga 500 N y resolución 0.1 N, montado en un banco de pruebas Sauter TVM-N motorizado. El instrumento se conecta, por medio de un ordenador, al software AFH-01 versión 1.0.8.6;
2. Calibre electrónico: con doble decimal para la medición de diámetros de muestra;
3. Panel de medición;
4. Cámara fotográfica Réflex;
5. Cilindro graduado de laboratorio;
6. Recipiente de plexiglás 50x50cm con hidrómetro de precisión.

Medidas morfométricas del sistema aéreo y radical de las plantas

Las muestras fueron transportadas al Laboratorio de Hidrología del Departamento de Ciencias Agrícolas, Alimentarias y Forestales para realizar un lavado final para la eliminación de residuos del suelo y un control de integridad de la muestra antes de las mediciones. Todas las mediciones se tomaron dentro de las 24 horas posteriores a la toma de muestras para preservar su estado de frescura.

Se midieron sobre las muestras de *A.mauritanicus O. miliacea H. coronarium*:

- Profundidad de excavación[m]
- Altura de la parte aérea [m]
- Amplitud de la parte aérea [m]
- Longitud de la raíces [m]
- Diámetro del cuello de la planta [cm]
- Número de raíces

En *M. lupulina, L. spartum, B. distachyon* se efectuaron medidas de:

- Volumen radical [m^3] calculado empíricamente mediante la técnica de medición del agua desplazada (Kolesnikov, 1971);
- Peso radical [g];
- Desarrollo radical [m] dado por la suma de las longitudes de cada raíz de la planta.

Para *R. officinalis* se han medido:

- Altura de la parte aérea [cm];
- Amplitud de la parte aérea cm];
- Profundidad radical [cm];
- Amplitud radical [cm];
- Peso húmedo de las raíces [g];
- Desarrollo radical [m];
- Diámetro máximo de las raíces [mm];
- Diámetro medio de las raíces [mm];
- Root density (RD) [kg/m^3] definida por la relación entre la masa radicular seca y el volumen del cilindro de suelo arraigado (Smit *et al*., 2000);
- Densidad de longitud de raíz (RLD) (m/m^3) definida como la relación entre el desarrollo radical y el volumen de la muestra de suelo arraigado.

Para las especies *A. mauritanicus*, *R. coronaria* e *S. junceum*, se han evaluado los siguientes parámetros:

- Amplitud de la parte aérea [cm]
- Altura de la parte aérea [cm]
- Amplitud radical [cm]
- Profundidad radical [cm]
- Profundidad de excavación [cm]
- Diámetro del cuello de la planta [mm]

Ensayos mecánicos sobre la tensión de rotura de las raíces

Los valores de resistencia a la tracción Tr, expresados en MPa, se obtuvieron bajo la hipótesis de sección circular de la raíz, de diámetro promedio Dm, con la expresión:

$$Tr = Fmax/(\pi\ Dm^2/4) \qquad (4)$$

Fmax [N] es el esfuerzo máximo de rotura. La relación entre diámetro y resistencia radicular a la tracción ha sido encontrada experimentalmente por varios autores (Burroughs y Thomas 1997; Bischetti *et al*. 2005) y puede ser considerada la firma biotécnica de la especie.

El protocolo de medidas establecía las siguientes medidas para el sistema radicular:

- Longitud estándar de la muestra de raíces (15 cm);
- Tres medidas de diámetro tomadas en los extremos y en el centro;
- Muestra con pequeñas variaciones de diámetro;
- Velocidad de ensayo de tracción de 7 mm/minuto.

Todas las pruebas se realizaron hasta que la muestra se rompió (Fig. 32).

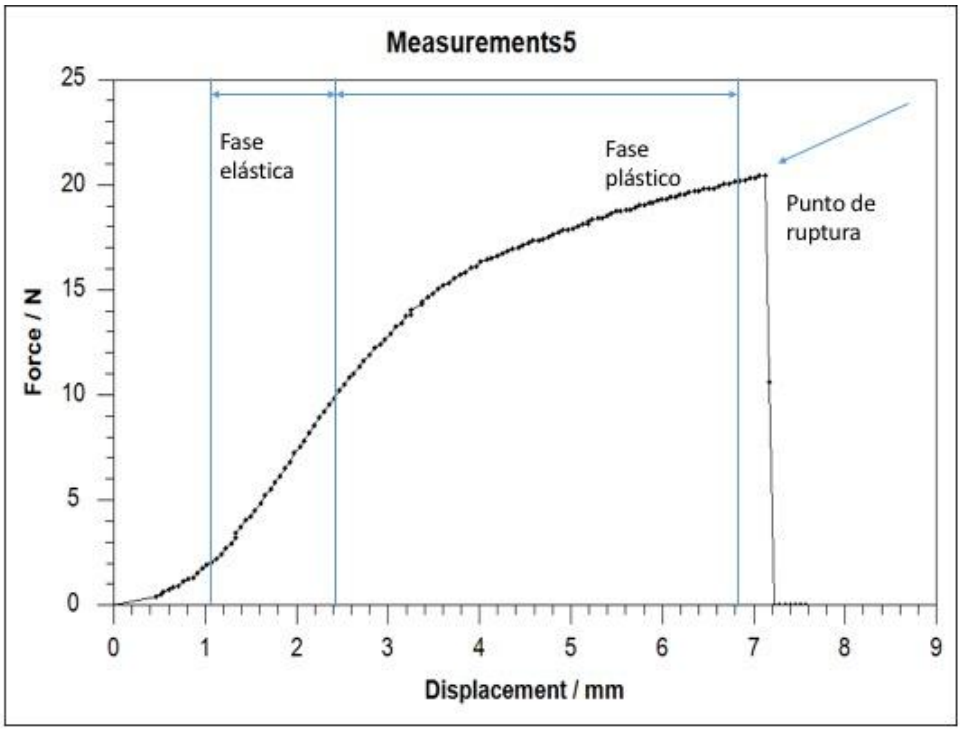

Figura 32 - *Ejemplo de curvas esfuerzo/deformación en un ensayo de tensión de tracción de una raíz.*

Sólo se consideraron ensayos que dieron lugar a curvas de esfuerzo/deformación en continuo aumento, con rotura en la sección intermedia de la probeta y sin signos de fallo en el sistema de acoplamiento.

Instalación de fajinas experimentales

Las fajinas se pusioeron en obras a lo largo del pie del terraplén de un camino de servicio dentro del Parco d'Orleans (38°06'27.73 "N; 13°20'59.48" E – Fig. 33)

Figura 33 - *Vista del área de instalación*.

La obra (Fig. 34), de 20 m de longitud, consta de 14 fajinas de dos cultivares diferentes: 7 de Catarratto y 7 de Cabernet.

Figura 34 - *Fase de puesta en obra de las fajinas experimentales.*

Las fajinas de sarmiento se rellenaron posteriormente con 30 litros de sustrato compuesto de varias mezclas de residuos de *P. oceanica*-Tierra según el siguiente esquema:

- 3 fajinas rellenas con 100% de residuos de *P.oceanica*;
- 3 fajinas envueltas en yute y rellenas con 100% de residuos de *P.oceanica*;
- 3 fajinas llenas de 100% tierra;
- 3 fajinas rellenas con 80% tierra - 20% de residuos de *P.oceanica*;
- 2 fajinas vacías como control.

Y para evaluar:

a) El microclima establecido en las obras;

b) La durabilidad de los materiales utilizados;

c) El arraigamiento de una especie arbustiva autóctona en los distintos sustratos.

En la instalación se plantaron 12 plantas de S. junceum, de las cuales:

- 3 encima de las fajinas;
- 3 dentro de las fajinas rellenas de residuos de *P. oceanica* 100%;
- 3 dentro de las fajinas rellenas de tierra 100%;
- 2 en tierra, fuera de las fajinas, como control.

A continuación se muestran algunas imágenes que representan las fases de puesta en obra de las fajinas experimentales (Fig. 35 y 36)

Fig. 35 – *Primeras fases de puesta en obra de las fajinas experimentales.*

Figura 36 - *Plantación de S. junceum en fajinas rellenas con 100% de residuos de P.oceanica (Marzo de 2017).*

Medición de Temperatura

Durante el periodo de julio-noviembre se realizaron mediciones de temperatura en las distintas tesis de fajinas. Se introdujeron los hobo data logger a una profundidad de 5 cm y no se tocaron durante los siguientes 4 meses, realizando mediciones continuas con un intervalo de tiempo de Δt de 30 minutos.

Figura 37 - *Posicionamiento de Hobo data logger cerca y dentro las fajinas.*

En particular, se han medido los siguientes valores de: temperatura ambiente (a), encima de las fajinas (b), dentro de las fajinas llenas de tierra 100% (c), dentro de las fajinas rellenas de residuos de *P. oceanica* 100% (d) en tierra (e) (Fig. 37).

Resultados

Sarmientos y características de las fajinas

Calidad mecánica de las muestras de sarmientos

Para probar las cualidades mecánicas de los sarmientos, se ha aplicado un criterio de clasificación basado en la evaluación de los principales parámetros de tensión. En las Figuras 38 y 39 se comparan los módulos de elasticidad longitudinal, E [MPa] y de tensiones de rotura, σ [MPa], de las muestras de sarmientos obtenidas de los ocho cultivares analizados.

A partir de la comparación, en términos de distribución (diagrama box plot), se detectaron diferencias significativas en la elasticidad entre los cultivares analizados (Fig. 38). Los valores mínimos de elasticidad se encontraron para Inzolia, Grecanico y Chardonnay (878.9 MPa), mientras que los valores máximos se encontraron en Syrah (4878.6 MPa).

Recordando que a mayor valor E corresponde una mayor rigidez, Cabernet, Grillo y Sirah presentan las mejores características de resistencia a la flexión con una clara prevalencia de Sirah; más deformables son Grecanico, Chardonnay, Catarratto y Nero d' Avola con valores E medios que oscilan entre 1200 y 2000 Mpa.

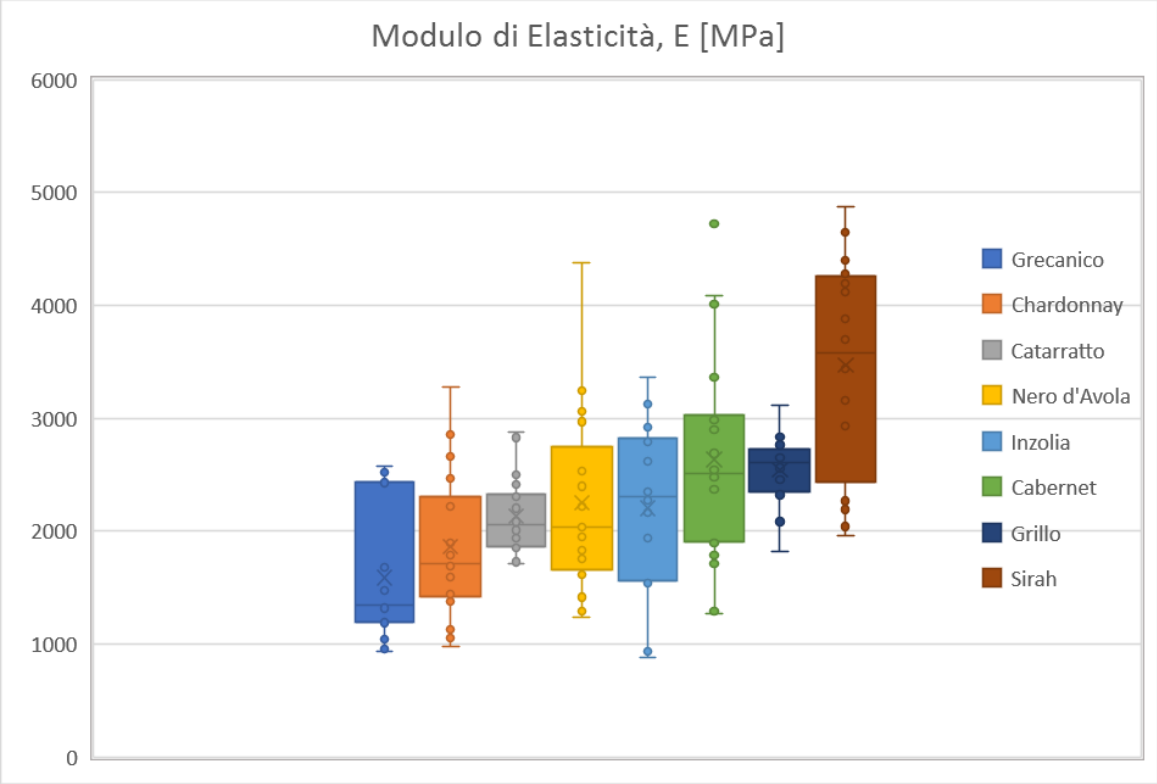

Figura 38 - *Comparación de las muestras del módulo de elasticidad para los 8 cultivares estudiados.*

Del mismo modo, existen diferencias significativas entre los valores de tensión de rotura de los 8 cultivares considerados (Fig. 39). Los valores más bajos de tensión de rotura se encontran para Inzolia, Nero d' Avola y Grecanico con un valor medio de unos 40 MPa, mientras que los valores más altos se encontran para Cabernet, con un valor medio de 53 MPa y un valor máximo superior a 70 MPa.

Del mismo modo, el cultivar Grillo muestra la menor variabilidad en los valores de tensión de rotura. Además Cabernet, Sirah y Chardonnay también muestran valores de resistencia a la tracción elevados entre los cultivares probados.

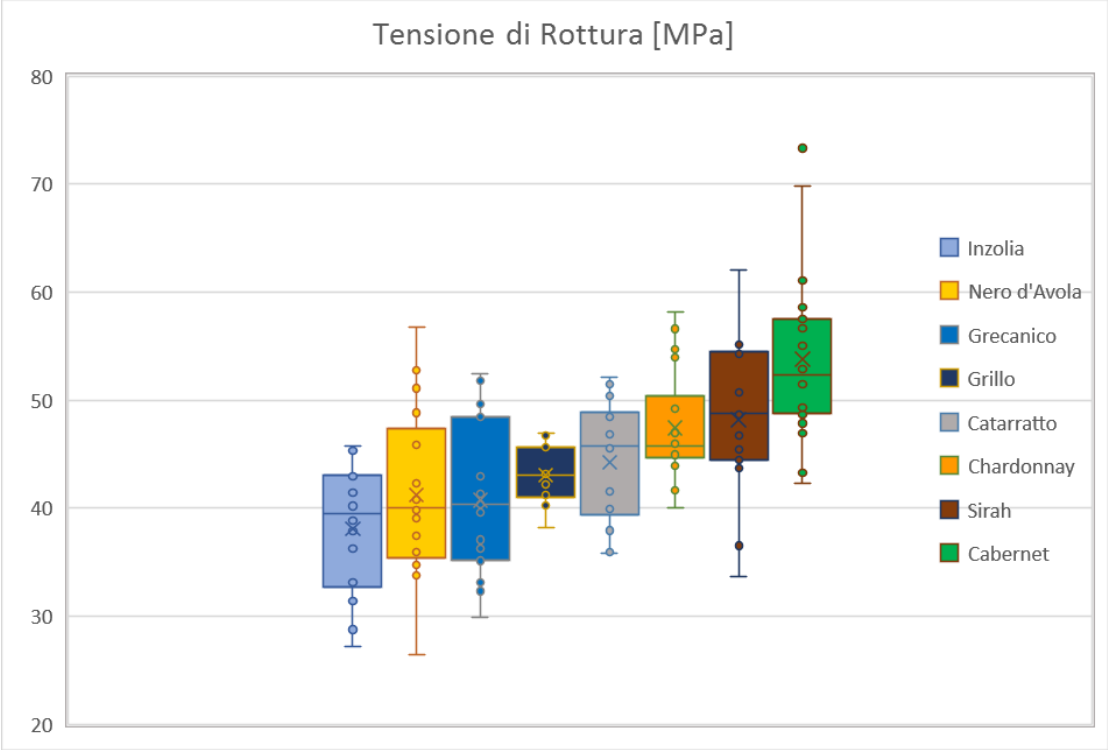

Figura 39 - *Comparación de las muestras de tensión de rotura de los 8 cultivares analizados.*

Se puede crear una imagen global de las características de tensión de las probetas de sarmientos, colocando las tensiones de rotura de las muestras en relación con los módulos de elasticidad correspondientes. La Figura 40a, muestra cómo se puede identificar una ley σ (E) para todos los cultivares, lineal con tendencias crecientes y sub-paralelas. Esto indica el comportamiento homogéneo de todos los sarmientos, que contempla el mismo incremento de la tensión de rotura al aumentar la E (mismo coeficiente angular).

El análisis de la covarianza confirmó, con un nivel de significación del 5%, el paralelismo de las regresiones lineales (Fig. 40b).

Las leyes empíricas más elevadas y, por lo tanto, con las mejores características de resistencia, son las de Cabernet y Chardonnay. Siguen, en orden, el Grecanico y el Catarratto.

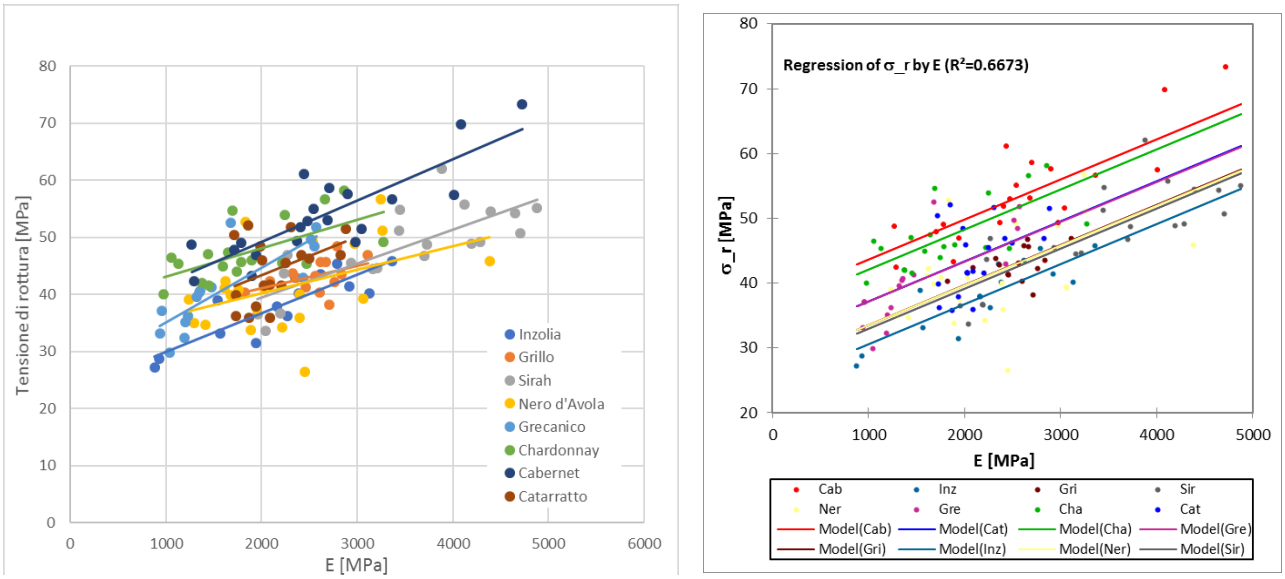

Figura 40 *– a)Diagrama las tensiones de rotura de las muestras de sarmientos en relación con los módulos de elasticidad correspondientes, b) regresión paralela.*

Teniendo en cuenta los resultados de las ensayos mecánicos y la disponibilidad de biomasa en el territorio regional, los cultivares Cabernet y Catarratto han sido seleccionados para el embalaje manual de fajinas experimentales puestas en obras en el Parco d' Orleans. En la Tabla 2 se muestran las características medias de las fajinas experimentales.

Tabla 2 *- Características medias de las fajinas experimentales.*

Variedad	Año de plantación	Diámetros sarmientos		Densidad media [kg/m^3]	Porosidad media [%]	Diámetro medio fajinas [m]
		Media [mm]	Coef. de variación			
Catarratto	2001	6,7	0,25	55,9	82	0,36
Cabernet	2001	6,2	0,33	57,3	87	0,37

Residuos de *Posidonia oceanica*

Medidas de salinidad

Se evaluó en el laboratorio la reducción de la salinidad en los residuos de *P. oceanica* recién varados y en los depositados durante 13 meses en el lugar de almacenamiento , mediante un proceso de lavado a presión constante. También se detectaron valores de pH en residuos recién varados.

La Figura 41 muestra, respectivamente, las variaciones de la conductividad eléctrica (CE) en los residuos de *P. oceánica* recién varados (3 muestras) y en los del sitio de almacenamiento (Calvo *et al*., 2016).

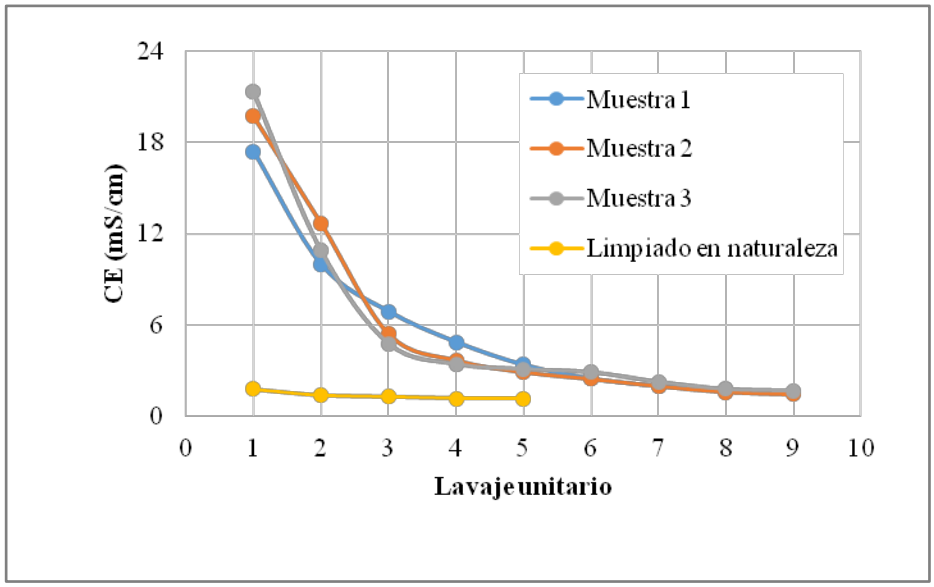

Figura 41 - Variación de la conductividad eléctrica (CE) durante el proceso de drenaje.

Los resultados muestran un alto valor inicial de la CE en el agua de drenaje (≅20 mS/cm) y una rápida reducción del contenido de sal ya con los primeros tres lavados unitarios; los últimos seis lavados refinan la reducción de la CE hasta la consecución de los valores aceptables de uso agrícola (2 mS/cm).

Los valores extremos del proceso de lavado se confirmaron por los análisis de salinidad realizados de acuerdo con un método standard, una dilución 1:20 (Tabla 3).

Tabla 3 - Características físico-químicas de los residuos de *P. oceanica recién varados*

	CE [mS/cm]	sal [%]	TDS [g/l]
Posidonia fresca no disuelta	18,57	13,97	9,28
Posidonia fresca disuelta	2,97	1,54	1,49

La condición de la salinidad de los residuos de posidonia depositados en el lugar de almacenamiento después de 13 meses de disolución natural de sales debido a las lluvias es diferente. Las mediciones realizadas en el primer lavaje unitario mostraron un CE de 1.8 mS/cm, que disminuyó a un 33% (CE = 1.2 mS/cm) en el segundo lavaje unitario (Fig. 41).

Los valores de pH en los residuos varados, en contraste con la conductividad eléctrica, a partir de valores pH =8.14, aumentaron progresivamente con los lavajes unitarios hasta estabilizarse a un valor de ≅ 8.27 al final del lavaje (Fig. 42).

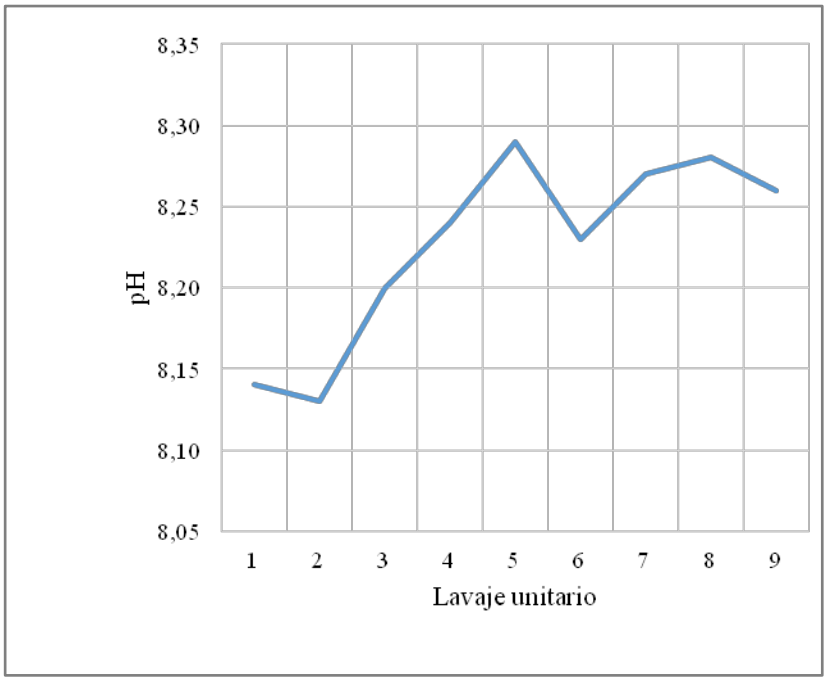

Figura 42 - *Variación del pH durante el proceso de drenaje.*

Proceso de infiltración

Anteriormente al estudio de infiltración, las muestras de residuos de *P. oceanica* tomadas del sitio de almacenamiento, fueron colocadas en un cilindro de 85x100 mm para evaluar las características físicas medias de: conductividad hidráulica saturada, densidad absoluta, densidad aparente, (Tabla 4). Un buen sustrato de cultivo tiene generalmente valores de 0.10 – 0.80 g/cm^3 de densidad

aparente en comparación con los valores de la tierra que varían entre 1.2 - 1.6 g/cm^3. Los residuos de *P. oceanica*, presentan valores de densidad aparente en promedio de 0.12 g /cm^3, por lo que los clasifica como buenos sustratos.

Tabla 4 - *Principales características físicas de los residuos de P. oceanica utilizadas en los ensayos y parámetros hidrológicos relacionados*

conductividad hidráulica saturada	K_s (mm/h)	1440
densidad absoluta	ρ_s (g/cm^3)	1.2
densidad aparente	ρ_b (g/cm^3)	0.121
contenido volumétrico de agua normalizado	θ_s (cm^3 cm^{-3})	0.899
escala de tiempo característica de infiltración	ω (h)	0.125
índice de distribución del tamaño de los poros	λ (h)	1.96

En la secuencia de prueba, la condición de humedad inicial Θ_0 varió de 0.030 a 0.197 (Fig. 43a) mientras que el volumen drenado, $\Theta_{0,VD}$ aumentó de 0.030 a 0.32. Durante las primeras pruebas, tras la aplicación de 4-5 volúmenes de lluvia (64-80 mm), no se encontraron diferencias entre los valores de Θ_0 y de $\Theta_{0,VD}$ que se sitúan en 0.1 (Fig. 43b). Posteriormente, los valores obtenidos del volumen drenado $\Theta_{0,VD}$, no afectado por la evaporación, fueron siempre mayores.

La condición de humedad inicial se calculó a partir de los datos obtenidos mediante el pesado, considerados más representativos por no estar sujetos a fenómenos de evaporación. La técnica experimental adoptada ha permitido así estudiar el efecto del aumento de la condición de humedad inicial sobre el tiempo de retardo operando, siempre sobre la misma muestra.

La Figura 43b ilustra la tendencia de Θ_0 a lo largo del tiempo durante las 22 pruebas; se observa que en los primeros diez días las variaciones de Θ_0 fueron más marcadas, aumentando a valores de 0.14, alcanzando posteriormente una condición de casi equilibrio entre los volúmenes de entrada de lluvia y los drenados a la salida, lo que impidió un mayor crecimiento de Θ_0 después del trigésimo día de prueba con Θ_0= 0.197. Esta consideración también se refleja en el hecho de que el volumen total drenado al final de las pruebas alcanza un valor cercano al volumen de lluvia suministrado (500 ml).

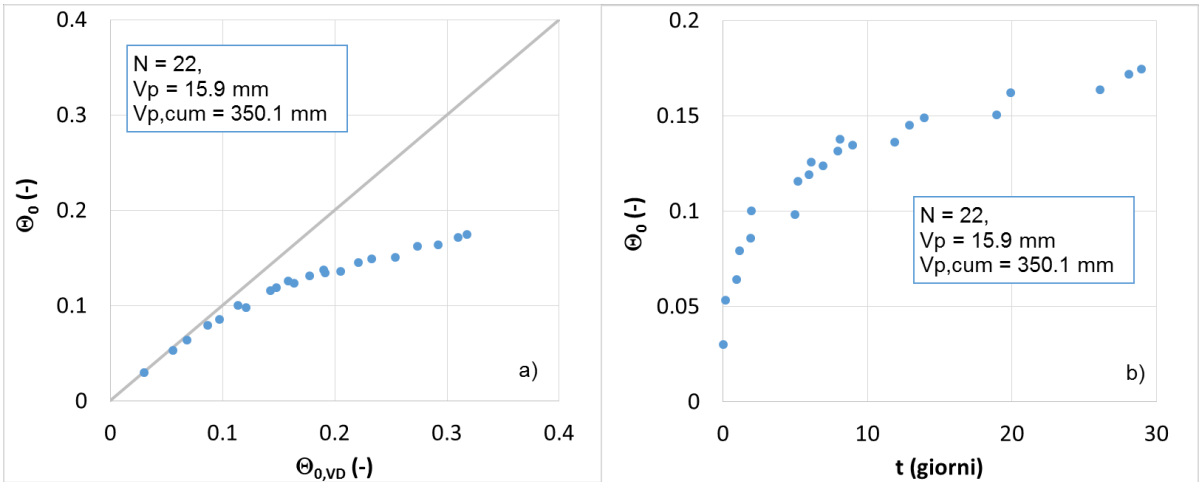

Figura 43 *– Comparación de los valores de las condiciones de humedad iniciales Θ_0, obtenidas mediante el peso de la muestra Θ_0 con los valores deducidos de la diferencia entre el volumen de lluvia y el volumen drenado $\Theta_{0,VD}$ y la tendencia de Θ_0*

El volumen drenado hasta el final de la lluvia, $Vd_{,FP}$, (Fig. 44a) mostró una reducción progresiva, de 13 a 3 mm, con el tiempo de retardo, td. En la misma Figura, se realiza una comparación de la línea que define el volumen de lluvia (Vp= 15.9 mm), mayor que $Vd_{,FP}$.

La Fig. 44b muestra la tendencia empírica de los tiempos de retardo con la condición de humedad inicial. En particular, los tiempos de retardo, con una cierta dispersión, aumentan con Θ_0 desde los valores iniciales de 3.87 minutos para la primera prueba hasta los 13.62 minutos de la última prueba.

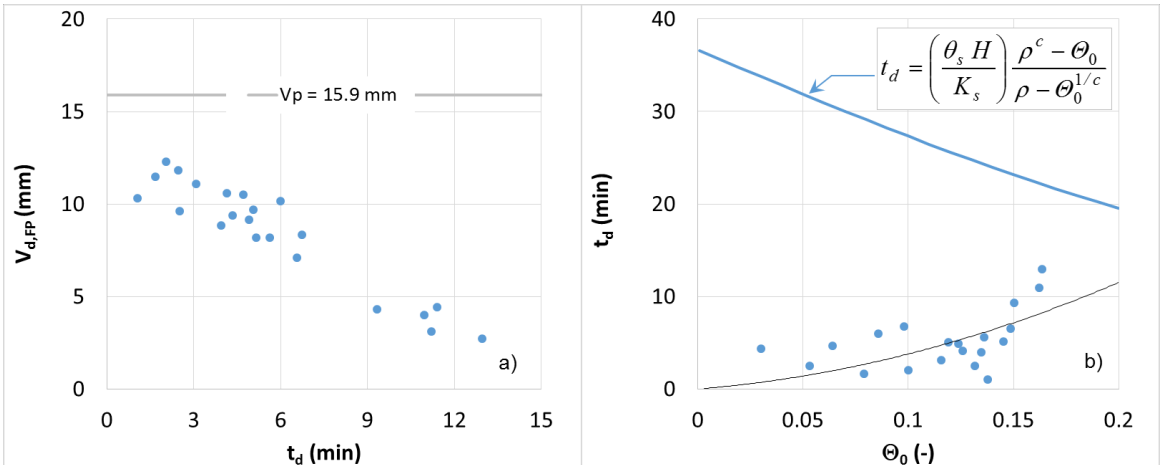

Figura 44 - *Tendencia de los volúmenes drenados al final de la lluvia, $V_{d,FP}$, con el tiempo de retardo de cada prueba, t_d, y comparación entre el vínculo experimental del tiempo de retardo y la condición de humedad inicial Θ_0*

En esta fase se ha observado cómo el proceso de compactación progresiva de la muestra ha llevado a un aumento en la densidad aparente y la consiguiente reducción de la porosidad y conductividad hidráulica saturada K_s

La densidad aparente, estimada empíricamente en función de la altura H de la muestra y mostrada en la Figura 45a, muestra una variación, de 0.130 a 0.140 g/cm^3 que resulta en una reducción de la porosidad de 0.892 a 0.883 cm^3/cm^3 (Fig. 45b).

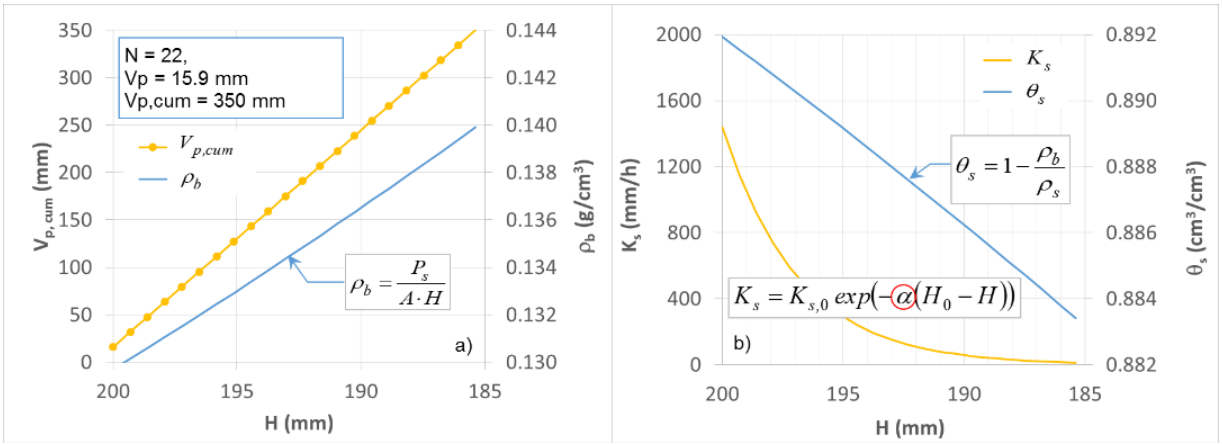

Figura 45 - *Evolución del volumen de lluvia acumulada, Vp, cum, densidad aparente, porosidad, y conductividad hidráulica saturada con la altura H de la muestra, medida a partir de su valor inicial (200 mm)*

Sobre la base de esta observación, el modelo de infiltración td (Θo) en medios altamente porosos ha sido modificado mediante la introducción del efecto de compactación y parcialización de la superficie afectada por el proceso de infiltración. Por esta razón, la variabilidad de la conductividad saturada se introdujo en el modelo básico mediante un parámetro de decaimiento α, y un factor de escala β, expresando la porosidad efectiva, proporcional sólo a la porción de superficie afectada por el proceso de infiltración:

$$t_d = \beta\left(\frac{(\rho_s - \rho_b(H))H}{\rho_s K_{s,0}^c exp(-\alpha(H_0 - H))^c}\right)\frac{i^c - K_{s,0}^c exp(-\alpha(H_0 - H))^c \Theta_0}{i - K_{s,0} exp(-\alpha(H_0 - H))\Theta_0^{1/c}} \qquad (5)$$

La Fig. 46a muestra el resultado de la calibración del modelo (5).

La Fig. 46b, por otra parte, muestra la ley de infiltración (5) calibrada en los datos experimentales para valores de intensidad de lluvia que varían de i=20 a i=100 mm/h, para los residuos de *P. oceanica*, con las características de la Tabla 4, en comparación con la ley de infiltración relativa a un suelo con las mismas características hidrológicas de los residuos de *P. oceanica*.

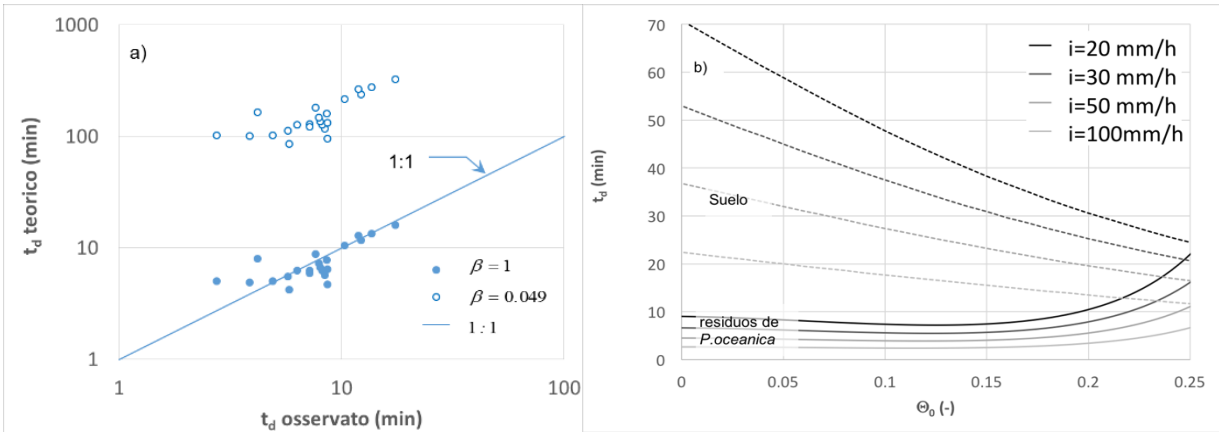

Figura 46 - (a) *Calibración resultado del modelo de infiltración, (b) Ley del tiempo de retardo, td a la intensidad de la lluvia, i, para los residuos de P. oceanica, con las características en Tabla 4, comparada con la ley relativa a un suelo con las mismas características hidrológicas.*

La diferencia en el comportamiento de los dos medios, residuos de *P. oceanica* y suelo, es evidente en la Figura 46b. Los residuos de *P. oceanica* presentan tiempos de retardo muy cortos en comparación con el suelo (filtración rápida), poco variable tanto con la intensidad como con las condiciones de humedad inicial. Mientras que el suelo muestra la reducción monótona típica en los tiempos de retardo, para los residuos de *P. oceanica*, hay un ligero aumento en el tiempo más allá de una condición de humedad inicial dada que indica una ligera reducción en la permeabilidad del medio en este campo.

Material Vegetal

Medidas morfométricas del sistema aéreo y radical de las plantas

Se han evaluado las principales características morfológicas de la parte aérea y radicular de las especies estudiadas (Tabla 5). En particular, en el caso de las especies *A. mauritanicus, O. miliacea* y *H. coronarium* extraídas del antiguo vertedero de Termini Imerese, las profundidades de excavación (P. excavación), de 1.90 m y mayor en el caso de A. *mauritanicus*, que fue debido al gran desarrollo del sistema radicular, de 2.15 m, caracterizado también por el mayor número de raíces (N° raíces), 1041. Medición también de la altura (H), amplitud (Aepi) de la parte aérea y diámetro del cuello de la planta (D cuello). Se midieron un total de 1389 raíces para las tres especies.

Tabla 5 – Características morfológicas de la parte aérea y radicular de *A.mauritanicus, O. miliacea* y *H. coronarium*

Especies vegetales	*A.mauritanicus*	*O. miliacea*	*H. coronarium*
P. excavación [m]	**1.90**	**0.80**	**0.45**
H [m]	**2.55**	**1.64**	**0.54**
Aepi [m]	**2.35**	**0.75**	**0.50**
L [m]	**2.15**	**1.45**	**0.40**
D cuello [cm]	**27.8**	**25.8**	**2.8**
N° raíces	**1041**	**211**	**137**

En la misma estación de muestreo se evaluaron las características del sistema radicular de la especie *M. Lupulina*, *L. spartum* y *B. distachyon* (Tabla 6). En particular, se evaluó el volumen de la parte radicular (Vol), medido por la técnica de inmersión en un recipiente de agua, el peso seco de las raíces (P) y el desarrollo radical (S) dado por la suma de la longitud de las raíces de la planta. *L. spartum* tiene los valores más altos con 20.9 cm^3 de volumen radicular, 25.07 g de peso radicular y 262 cm de desarrollo radicular.

Tabla 6 – *Características de la parte radicular de M. Lupulina, L. spartum y B. distachyon*

Especies vegetales	*Vol [cm^3]*	*P [g]*	*S [cm]*
M. lupulina.	**11.41**	**13.67**	**116.5**
L. spartum	**20.9**	**25.07**	**263**
B. distachyon	**0.49**	**0.41**	**60.9**

Las muestras de *R. officinalis* de dos diferentes edades de implantación (1999 y 2005) y tallos (erectos y procumbentes) fueron tomadas en el Parco d' Orleans (Tabla 7). La mayor amplitud radicular (Aipo) del tallo procumbente - 117 cm (1999) y 122 cm (2005) - cuya forma se especifica en una elipse, sigue una conformación aérea (Aepi) más alargada - 260 cm (1999) y 230 cm (2005) - del tallo erecto con 100 cm (1999) y 140 cm (2005).

Se reducen en su lugar las profundidades de la parte radicular (P. Radicular) del tallo procumbente que, variando de 35 cm (1999) a 40 cm (2005), hacen que el sistema radicular, en sí mismo, asuma una forma esférica aplanada de morfología Heart (Kokutse *et al*., 2006).

Cuanto mayor sea la profundidad radicular en el tallo erecto de *R. officinalis* (48 cm en 1999), las raíces tienen diámetros (D max) más uniformes en el tallo procumbente con 10.5 cm (1999) y 14.8 cm (2005); en el tallo erecto los valores muestran una mayor variabilidad entre 5.4 cm (1999) y 24.8 cm (2005).

La caracterización morfológica del sistema radicular es descrita por la Root Density (RD) definida por la relación entre la masa radicular seca y el volumen del cilindro del suelo arraigado (Smith *et al*., 2000). Para *R. officinalis*, los valores de RD son 3.15 kg/m^3 (1999) y 1.61 kg/m^3 (2005) con tallo erecto y 2.50 kg/m^3 (1999) y 3.28 kg/m^3 (2005) con tallo procumbente.

Root Leght Density (RLD), definida como la relación entre el desarrollo radicular y el volumen de la muestra del suelo arraigado, tiene valores de 505 m/m^3 (1999) y 767 m/m^3 (2005) en el tallo erecto, 416 m/m^3 (1999) y 417 m/m^3 (2005) en el tallo procumbente.

Tabla 7 – *Características morfológicas de la parte aérea y radicular de R. Officinalis tallo erecto y procumbente*

	Rosmarinus officinalis (e)		*Rosmarinus officinalis (p)*	
Edad	**1999**	**2005**	**1999**	**2005**
H [cm]	**180**	**190**	**100**	**195**
Aepi [cm]	**100**	**140**	**260**	**230**
P. radicular[cm]	**48**	**30**	**35**	**40**
Aipo [cm]	**86**	**101(85)**	**117(95)**	**122(92)**
P [g]	**1172**	**408**	**1017**	**1542**
S [m]	**140.8**	**155.1**	**127.1**	**146.8**
D max [mm]	**24.8**	**5.4**	**10.5**	**14.8**
D med [mm]	**1.78**	**0.81**	**1.14**	**0.96**
RD [kg/m^3]	**3.15**	**1.61**	**2.50**	**3.28**
RLD [m/m^3]	**505**	**767**	**416**	**417**

En el distrito del mirto de Monreale (Pa) se llevaron a cabo tres campañas de muestreo sobre las especies *A. mauritanicus, R. coronaria y S. junceum* con diferente posición de plano y pendiente (Tabla 8). *A. mauritanicus* tiene valores en promedio más altos de amplitud aérea en caso de orientación en pendiente y menor profundidad radicular.

Tabla 8 – *Características morfológicas de la parte aérea y radical de A. mauritanicus posición de pendiente y plano*

A. mauritanicus	*Muestra*	*Aepi [cm]*	*H [cm]*	*Aipo [cm]*	*P. radical [cm]*	*P. excavación [cm]*
Pendiente 22°	**1**	**50**	**85**	**23**	**18**	**10**
	2	**75**	**83**	**21**	**18**	**10**
	3	**105**	**90**	**36**	**25**	**15**
	4	**68**	**94**	**36**	**27**	**15**
Plano	**1**	**87**	**80**	**42**	**25**	**20**
	2	**68**	**80**	**41**	**27**	**25**
	3	**64**	**83**	**37**	**27**	**25**
	4	**62**	**84**	**40**	**27**	**25**

En el caso de R. coronaria, los valores de amplitud aérea, altura, amplitud radicular y profundidad radicular son comparables en las dos posiciones de pendiente y de plano (Tabla 9).

Tabla 9 – *Características morfológicas de la parte aérea y radical de R. coronaria posición de pendiente y plano*

R. coronaria	*Muestra*	*Aepi [cm]*	*H [cm]*	*Aipo [cm]*	*P.radical [cm]*	*P.excavación [cm]*
Pendiente 22°	**1**	**67**	**106**	**60**	**35**	**20**
	2	**60**	**90**	**56**	**30**	**20**
	3	**55**	**88**	**58**	**35**	**25**
	4	**71**	**90**	**62**	**40**	**30**
Plano	**1**	**72**	**115**	**70**	**40**	**30**
	2	**65**	**110**	**43**	**30**	**20**
	3	**43**	**85**	**50**	**37**	**30**
	4	**64**	**100**	**35**	**33**	**25**

En el caso de S. junceum, en la posición de pendiente se registra, en promedio, la mayor profundidad radicular y la menor amplitud aérea (Tabla 10).

Tabla 10 – *Características morfológicas de la parte aérea y radicular de S. junceum posición de pendiente y plano*

S. junceum	*Muestra*	*Aepi [cm]*	*H [cm]*	*Aipo [cm]*	*P. radical [cm]*	*P. excavación [cm]*	*D. cuello [mm]*
Pendiente 22°	**1**	**64**	**96**	**38**	**35**	**33**	**15**
	2	**88**	**82**	**45**	**64**	**50**	**17**
	3	**55**	**130**	**38**	**57**	**31**	**12**
	4	**73**	**105**	**52**	**55**	**28**	**16**
Plano	**1**	**74**	**98**	**61**	**52**	**50**	**15**
	2	**56**	**89**	**41**	**38**	**33**	**17**
	3	**56**	**85**	**40**	**53**	**41**	**18**
	4	**93**	**120**	**51**	**52**	**41**	**16**

Igualmente en la muestra de Collesano, *S. junceum* presenta la mayor profundidad radicular en la posición de pendiente y amplitud aérea comparable entre las dos posiciones de pendiente y plano (Tabla 11).

Tabla 11– *Características morfológicas de la parte aérea y radicular de S. junceum posición de pendiente y plano*

S. junceum	*Muestra*	*Aepi [cm]*	*H [cm]*	*Aipo [cm]*	*P. radical [cm]*	*P. excavación [cm]*	*D. cuello [mm]*
Pendiente 28°	**1**	**33**	**96**	**40**	**180**	**80**	**32.53**
	2	**25**	**95**	**30**	**145**	**75**	**30.73**
Plano	**1**	**30**	**92**	**25**	**61**	**70**	**33.24**
	2	**32**	**90**	**23**	**104**	**75**	**31.63**
	3	**27**	**91**	**30**	**62**	**70**	**25.89**

En la última estación de toma de muestras, en Castelbuono, la posición de pendiente de *S. junceum* tiene valores significativamente más altos de profundidad radicular, de amplitud y de altura de la parte aérea (Tabla 12).

Tabla 12– *Características morfológicas de la parte aérea y radicular de S. junceum posición de pendiente y plano*

	Muestra	*Aepi [cm]*	*H [cm]*	*Aipo [cm]*	*P. radical [cm]*	*P. excavación [cm]*	*D. cuello [mm]*
Pendiente 40°	**1**	**61**	**74**	**60**	**89**	**69**	**11.21**
	2	**42**	**76**	**48**	**49**	**80**	**14.91**
	3	**51**	**76**	**37**	**61**	**61**	**11.85**
Plano	**1**	**22**	**57**	**11**	**40**	**40**	**10**
	2	**16**	**55**	**20**	**40**	**40**	**10.82**
	3	**50**	**90**	**22**	**30**	**30**	**15.32**

Las diferencias entre las profundidades radiculares en las dos posiciones de pendiente y de plano, han sido evidentes durante la fase de extracción de las plantas. Las partes radiculares de *S. juncem* crecidas en posición de pendiente y de plano, son morfológicamente diferentes (Fig. 47)

Figura 47 - *Diferente morfológia en las plantas de S. junceum crecidas en posición de pendiente (S) y de plano (P).*

Características biotécnicas

Las características biotécnicas se han estimado mediante ensayos de resistencia a la rotura de las raíces de las plantas muestreadas. En el lugar donde se encontraba el antiguo vertedero de Termini Imerese, se tomaron 6 especies vegetales. Las evoluciones experimentales de Tr (d) realizadas en las raíces (Fig. 48) muestran una tendencia de aumento de la resistencia de tracción al diámetro decreciente (Burroughs y Thomas, 1977; Bischetti *et al*., 2005).

O. miliacea tiene la mejor tensión de rotura de las raíces, con valores superiores a 400 MPa; *H coronarium* tiene valores de 200 MPa y *L. spartum* 140 MPa, mientras que *M. lupolina* y B. distachyon muestran en promedio, valores de alrededor de 100 MPa.

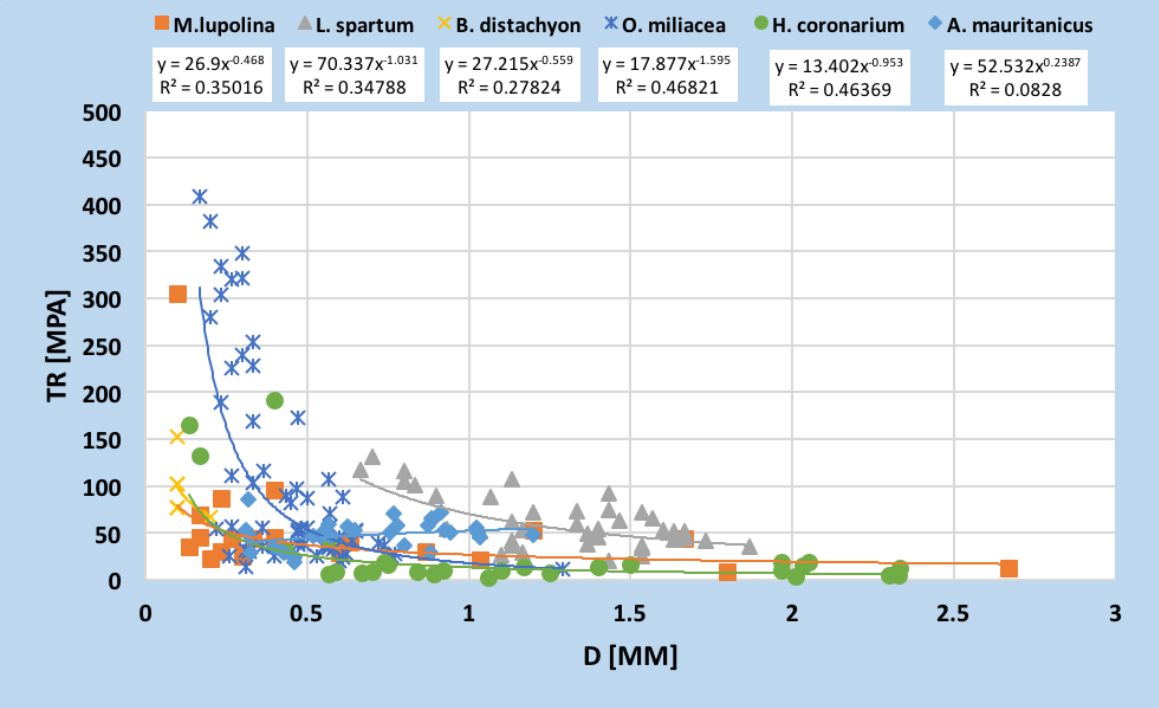

Figura 48- *Ensayos de tracción en Ampelodesmos mauritanicus, Medicago lupulina L, Lygeum spartum L. Brachypodium distachyon Oryzopsis miliaceum, Hedysarum coronarium*

Las muestras de *R. officinalis* extraídas en el Parco d' Orleans muestran tendencias, para ambos tallos, con una variación limitada en la tensión de rotura con los diámetros medios (D) y una reducción de la resistencia con el aumento de la edad (49a).

El modelo "plano" de las funciones Tr (D) permite comparar los datos en términos de distribución (Fig. 49b) mostrando los cuartiles, promedios, valores máximos, mínimos y outlayers de las 4 muestras de tensión de tracción. También en esta representación hay una tendencia a reducir las tensiones con el aumento de la edad (Tuttolomondo *et al*., 2017).

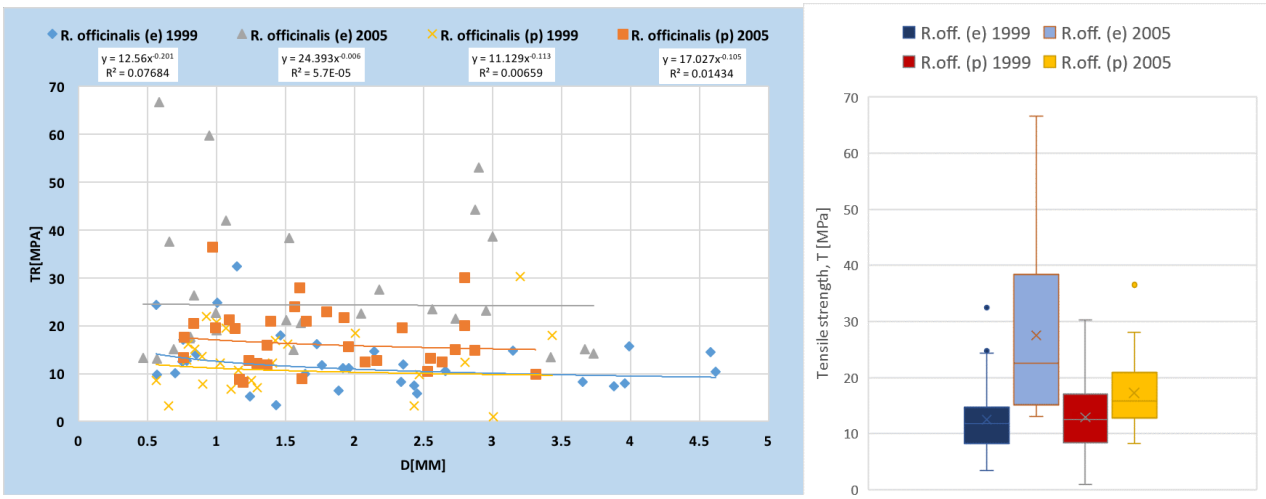

Figura 49 *- a) Ensayos de tracción en R. officinalis tallo erecto y procumbente; b boxplot cuartiles, promedios, valores máximos, mínimos y outlayers de las 4 muestras de tensión de tracción.*

Las muestras de *A. mauritanicus* tomadas en Mirto y Monreale muestran los valores de tensión de rotura más elevados en posición de plano. En los diámetros más pequeños, entre 0.3 y 0.7 mm, las dos categorías de muestra dieron tensiones medias de unos 45 MPa, alcanzando en algunos casos valores entre 60-90 MPa (Fig. 50).

Por otra parte, a medida que aumentan los diámetros, el comportamiento de las muestras de diferentes posiciones, de pendiente y de plano cambia, mostrando una marcada tendencia de las muestras en plano para mostrar tensiones más altas en comparación con las muestras en pendiente (Fig. 50).

Para *A. mauritanicus* se observa que la especie no presenta diferencias particulares en las tensiones de rotura en el rango de diámetros pequeños. Sin embargo, las diferencias se acentúan a medida que aumentan los diámetros.

La comparación de las posiciones de pendiente y de plano, no revela diferencias significativas entre las muestras de *R. coriaria*. Los puntos tienden a coincidir y las líneas de tendencia se cruzan, lo que confirma la ausencia de diferencias significativas entre las dos muestras, cuya tensión media oscila alrededor de 30 MPa.

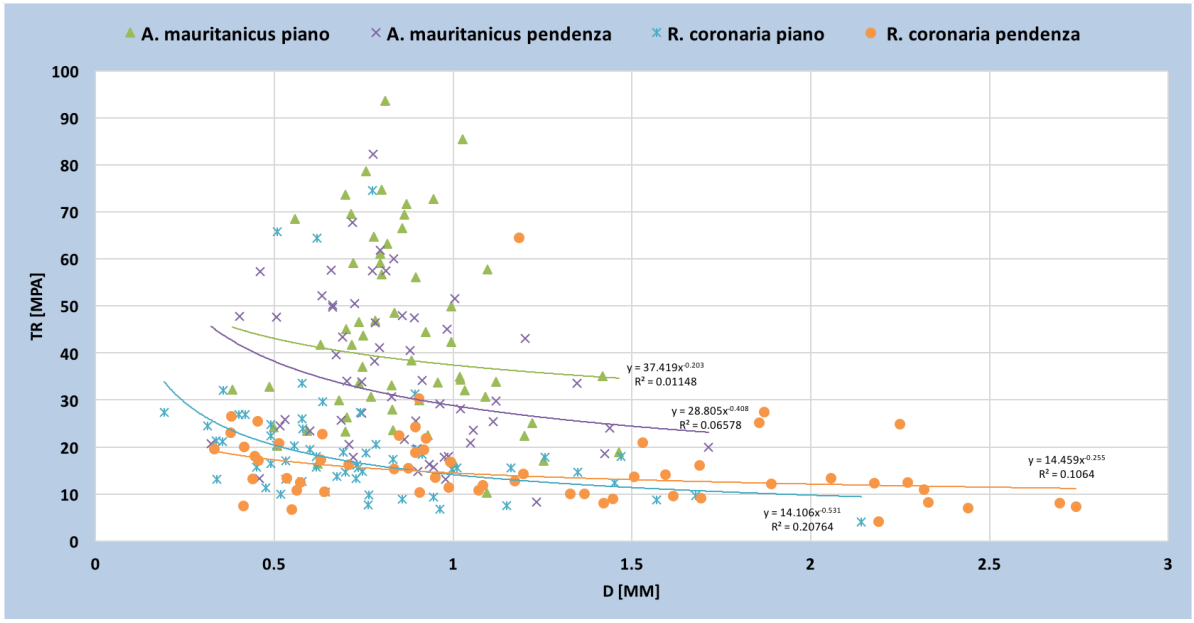

Figura 50 - *Ensayos de tracción en A. mauritanicus e R. coriaria posición de pendiente y plano.*

En las tres campañas de muestreo, las raíces de *S. junceum* que mostraron los valores de tensión de rotura más altos son las que se tomaron en posiciones de pendiente (Fig. 51-53). La línea de tendencia para estas muestras se desplaza hacia arriba en relación con la línea de tendencia de las muestras de posiciones de plano, que tienen valores de tensión siempre más bajos.

En los diámetros más pequeños 0,5 mm, los valores de la tensión de rotura son muy similares 61-70 MPa, en las dos posiciones de pendiente y plano, mientras que en los diámetros más grandes 2 mm, la tensión de rotura de las muestras de plano es inferior a la de las muestras de pendiente. De hecho, de 20 MPa a casi 80 MPa en el sitio A (Collesano), de 20 MPa a 50 MPa en el sitio B (Castelbuono), de 20 MPa a 40 MPa en el sitio C (Monreale).

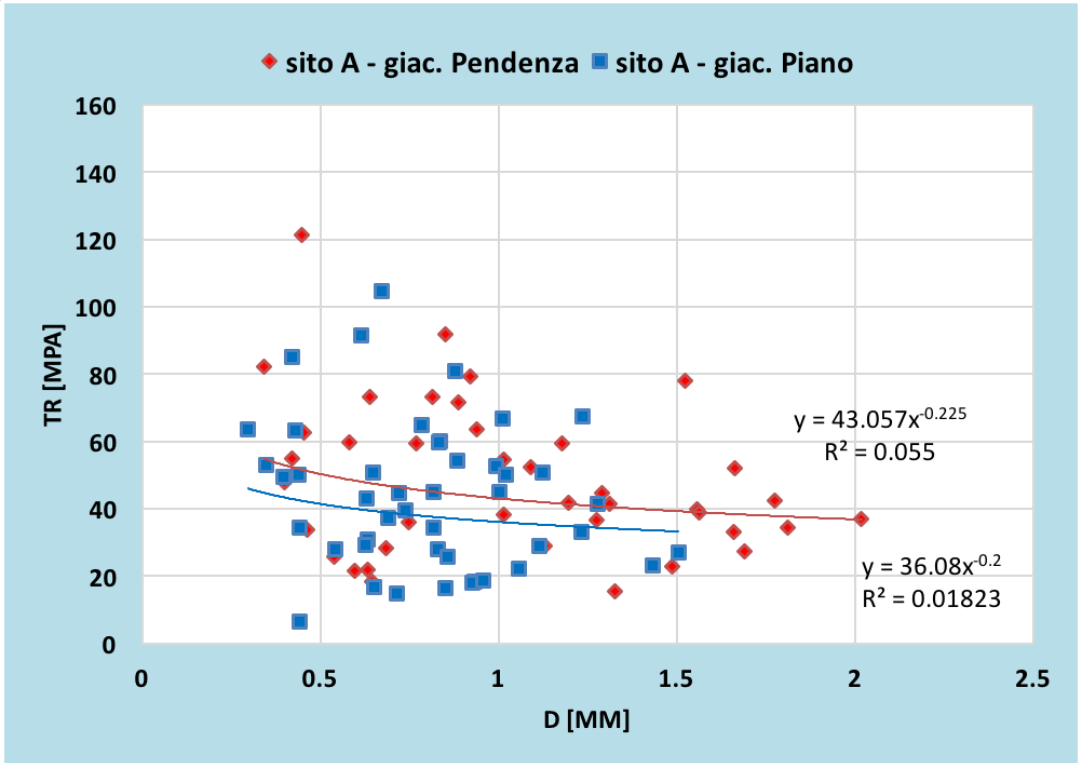

Figura 51 - *Ensayos de tracción en S. junceum posición de pendiente y plano sitio A (Collesano)*

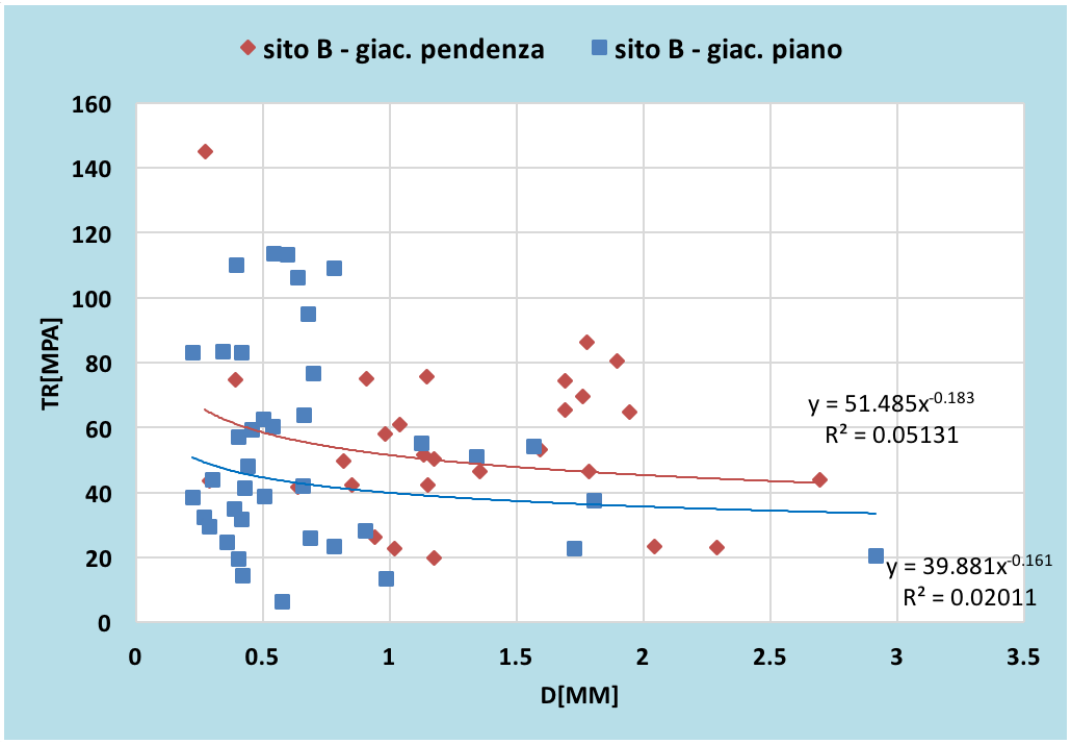

Figura 52 - *Ensayos de tracción en S. junceum posición de pendiente y plano sitio B (Castelbuono)*

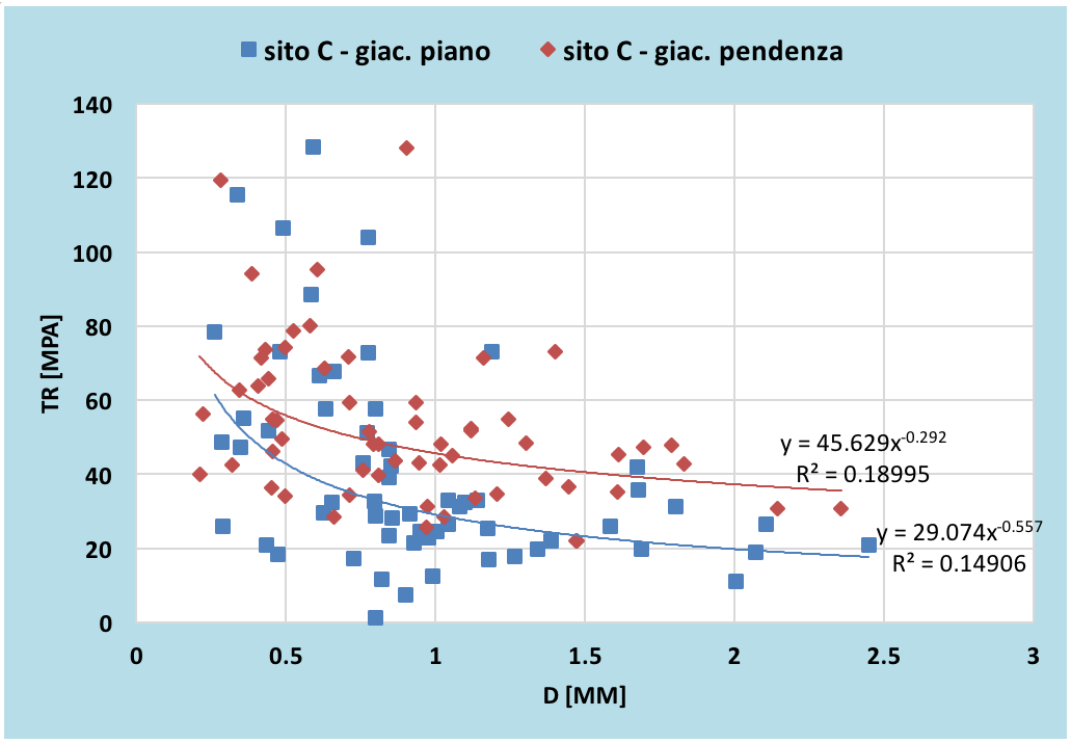

Figura 53 - *Ensayos de tracción en S. junceum posición de pendiente y plano sitio C (Monreale)*

En la Figura 54 se muestra la comparación en términos de distribución (box plot) entre las seis muestras de tensión de ruptura divididas por sitio (A, B, C) y por posición de pendiente (S) y plano (P).

En el gráfico, en rojo, se representan muestras con posiciones de pendiente (S), en azul, muestras con posiciones de plano (P). Se observa que las muestras con posiciones de pendiente tienen una variabilidad más limitada que aquellas con posiciones de plano; en todos los casos, las muestras con posiciones de pendiente se colocan más arriba.

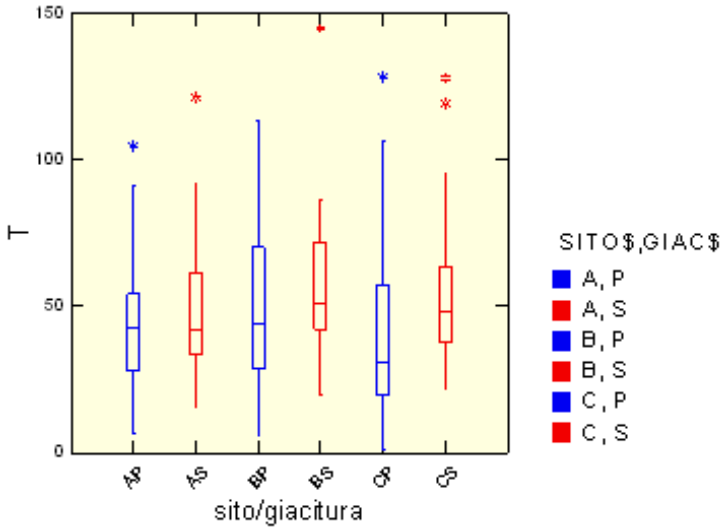

Figura 54- *Box plot de los ensayos de tracción en Spartium junceum en posición de pendiente (S) y plano (P)y por sitio (A, B, C)*

Si se superponen las muestras por el lugar de muestreo (Fig. 55a) y la posición (Fig. 55b), se puede observar mejor el efecto de los dos factores. La diferencia en este caso no es significativa. También en esta representación, la diferencia entre las muestras de diferentes posiciones de pendiente y plano acostadas parece ser más significativa (Fig. 54b).

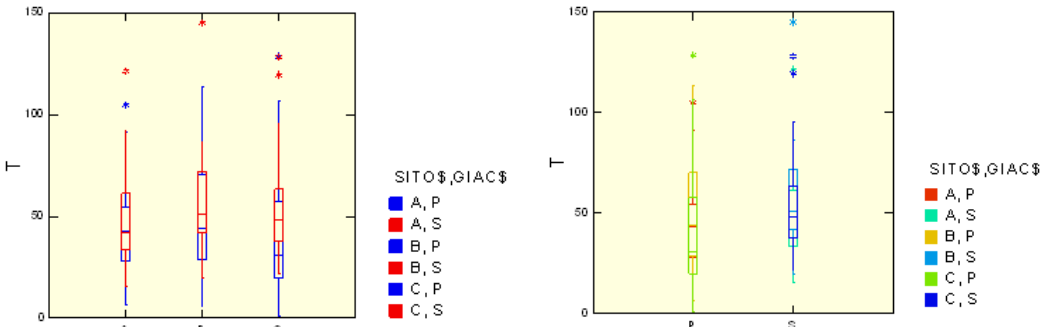

Figura 55 - *Box plot de los ensayos de tracción en Spartium junceum en posición de pendiente (S) y plano (P)con sitio (A, B, C)*

El análisis de la covarianza (ANCOVA) confirma la relevancia estadística de la diferencia de tensiones en relación de la posición de pendientes y de plano (Fig. 56). Por otra parte, la diferencia de tensión media entre los diferentes sitios (A, B, C) no es significativa.

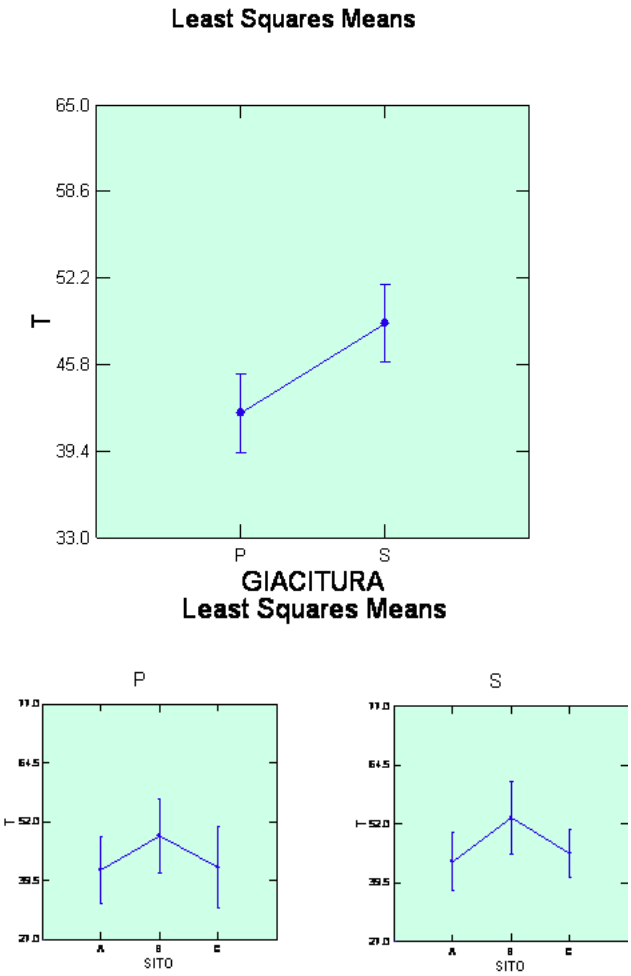

Figura 56- *Análisis de la covarianza (ANCOVA) de las diferentes posiciones de pendiente y plano en los diferentes sitios (A, B, C) en S. junceum*

Basándose en el resultado del ANCOVA, por posición fija, es posible agrupar todos los datos de tensión de las raíces tomadas en los 3 sitios diferentes (Monreale, Collesano y Castelbuono), normalizándolos con respecto al valor medio, Tm. El resultado, en términos de la ley de regresión T/Tm (log D), muestra, para *S. junceum*, la diferencia entre la condición de tensión en pendiente (puntos azules) y en plano (puntos rojos) (Fig. 57).

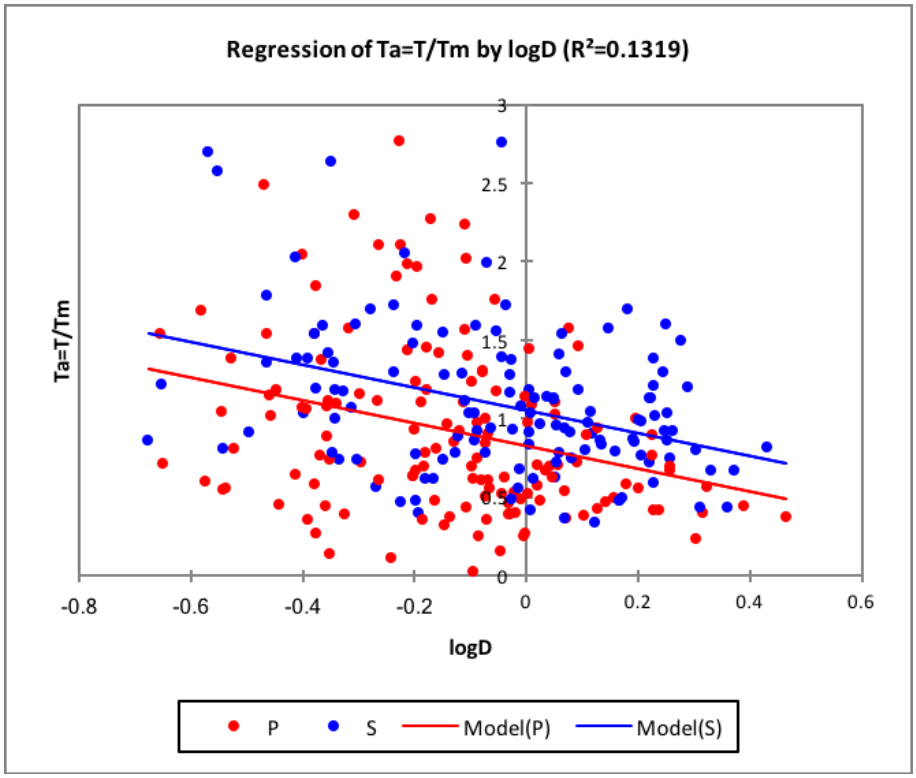

Figura 57 *– Agrupación de todos los datos de tensión de las raíces tomadas en los 3 sitios (A, B, C) diferentes normalizándolos con respecto al valor medio, Tm.*

Instalación de fajinas experimentales

Temperatura

Los valores de temperatura se registraron de forma continua, cada 30 minutos, en la instalación de fajinas experimentales mediante los Data Logger situados en el ambiente externo, enterrados encima de las fajinas, dentro de las fajinas rellenas de tierra, dentro de las fajinas rellenas de residuos de *P.oceanica* y en la tierra adyacente a la instalación experimental.

Como consecuencia de eventos lluviosos, se desenterraron los registradores de datos enterrados encima de las fajinas y dentro de las fajinas llenas de tierra, distorsionando así las mediciones registradas durante el período de detección.

Por lo tanto, se utilizaron los datos registrados por los Data Logger ubicados: a) en el ambiente externo, b) dentro de las fajinas rellenas de *P. oceanica* 100% y c) en la tierra adyacente a la instalación experimental.

El intervalo de tiempo para registrar los datos de temperatura se sitúa entre el 14.07.2017 y el 20.11.2017. En total, se registraron 6201 valores de temperatura para cada uno de los tres registradores de datos.

Los valores máximos y mínimos de temperatura registrados fueron 55.1°C y 5.6°C en el ambiente externo, 36.6°C y 9.7°C en los residuos de *P.oceanica* dentro de las fajinas y 43.2°C y 11.9°C en la tierra adyacente a la instalación experimental.

Las temperaturas medias más bajas se encuentran en los residuos de *P. oceanica* dentro de las fajinas, tanto en el periodo estival (25.7±3.6) como en todo el periodo de mediciones (21.8±5.2). Los valores medios, mínimos y máximos, (Tabla 13) se midieron en el ambiente externo durante el periodo otoñal (16.8±4.6) y en la tierra adyacente a la instalación experimental durante el periodo estival (29.8±5.2), con una variabilidad (±DS) naturalmente inferior a la registrada en el mismo intervalo de tiempo en el ambiente exterior (28.0±10.0).

Tabla 13 – Valores medios de temperatura (±DS) registrados dentro y cerca de la instalación experimental.

	Ambiente (media±DS)	**Residuos de *P. oceanica* (media±DS)**	**Tierra (media±DS)**
14.07.2017-21.09.2017	28.0±10.0	25.7±3.6	29.8±5.2
21.09.2017-20.11.2017	16.8±4.6	17.5±3.0	18.5±3.0
14.07.2017-20.11.2017	22.7±9.7	21.8±5.2	24.5±7.1

Con referencia al período de observación (julio-noviembre), los gráficos de las Figuras 58 y 59 muestran la comparación entre la temperatura ambiente y la temperatura de los residuos de *P. oceanica* dentro de las fajinas y entre la temperatura ambiente y en la tierra adyacente a la instalación experimental.

El gráfico de la Figura 60 muestra la superposición de las tres condiciones de medición.

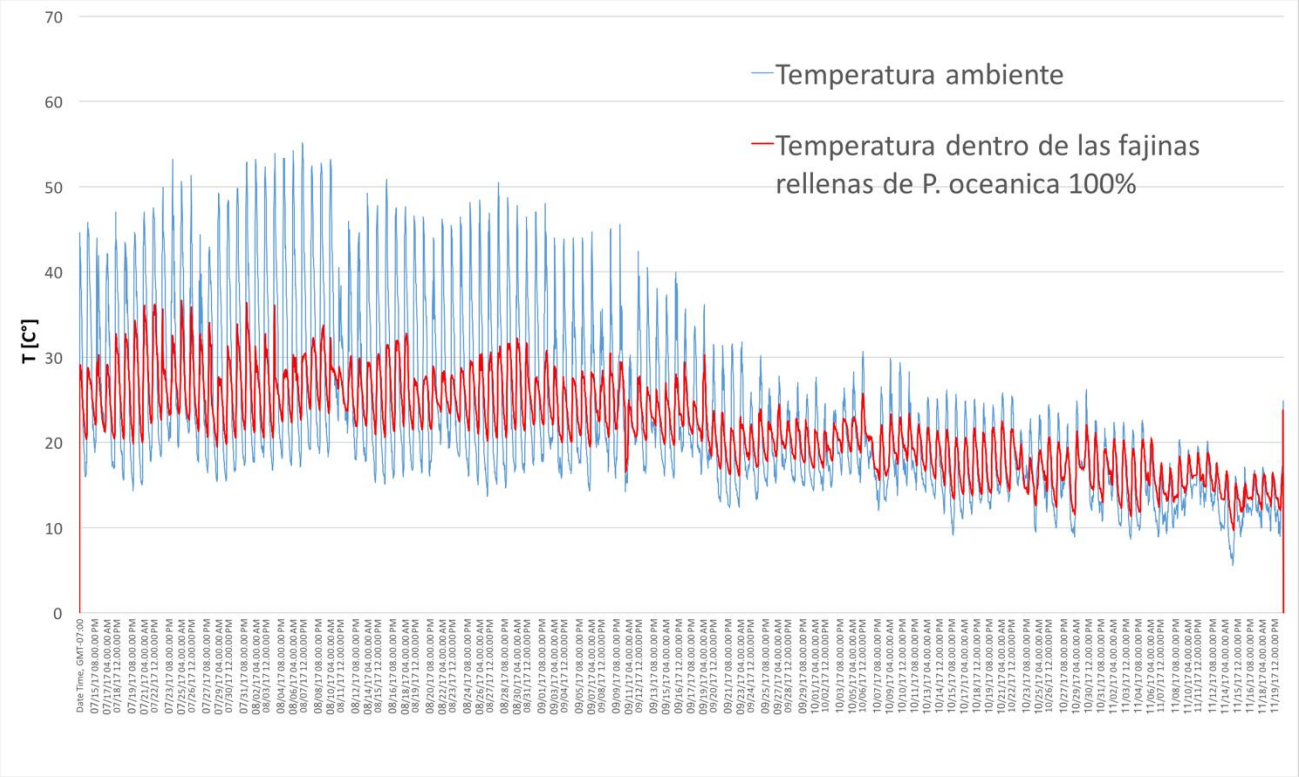

Figura 58 - *Comparación de los valores de temperatura entre el ambiente y la temperatura de los residuos de P. oceanica dentro de las fajinas*

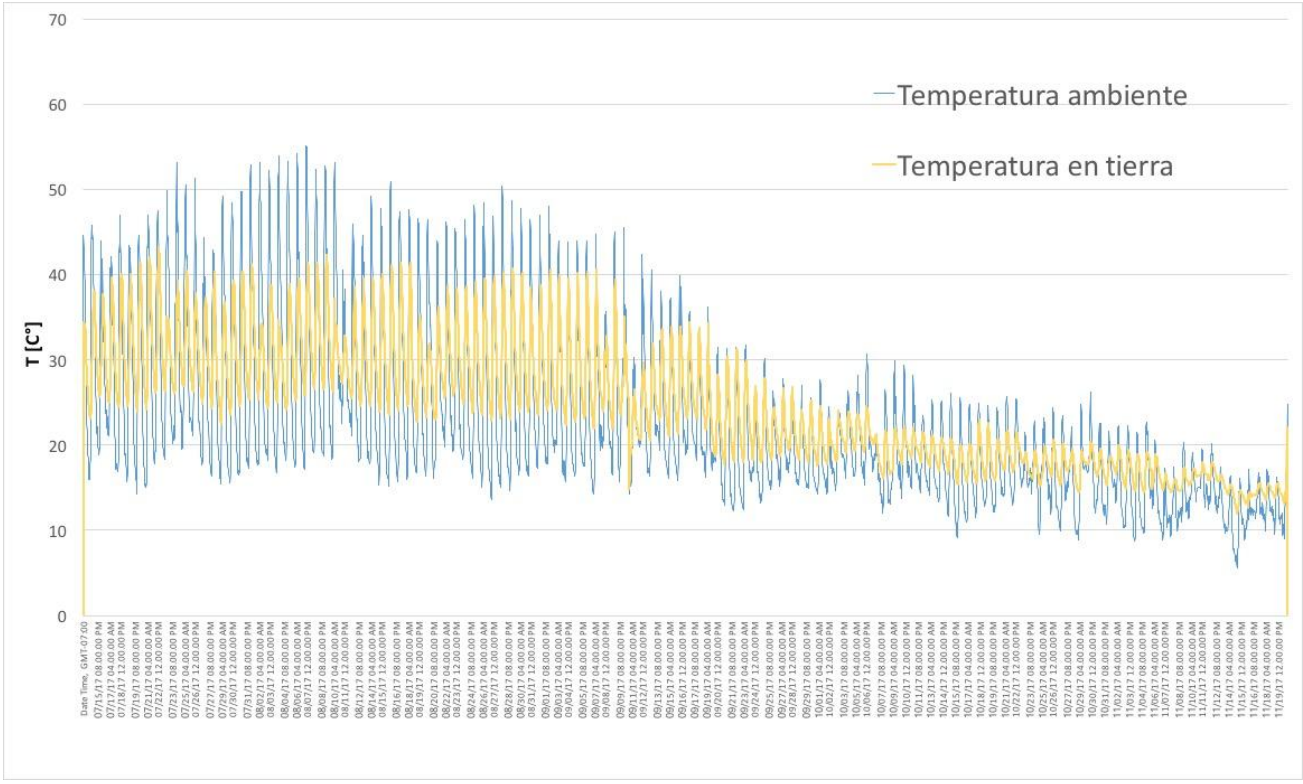

Figura 59 - *Comparación de los valores de temperatura entre el ambiente y la temperatura en la tierra adyacente a la instalación experimental.*

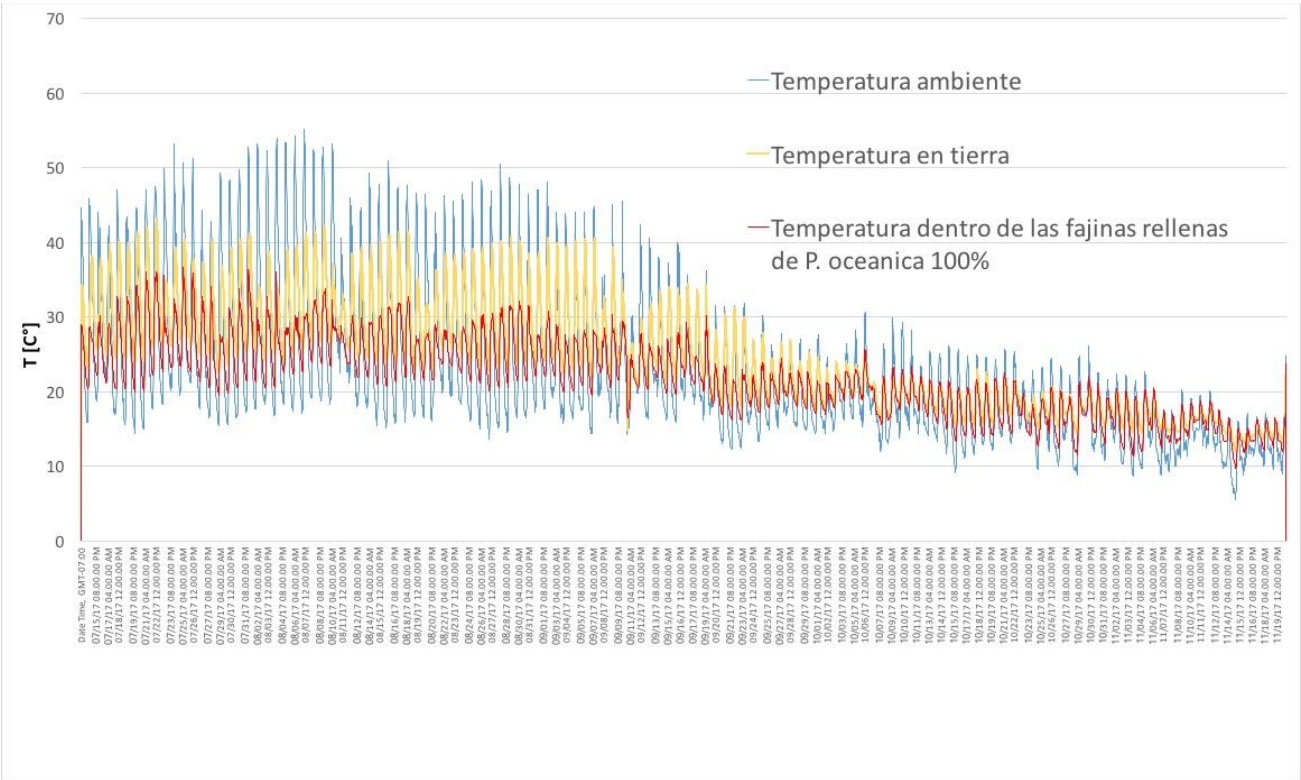

Figura 60 - *Comparación de los valores de temperatura entre el ambiente, la temperatura de los residuos de P. oceanica dentro de las fajinas y la temperatura en la tierra adyacente a la instalación experimental.*

Arraigamiento y crecimiento de *Spartium junceum*

Para evaluar el arraigo y el crecimiento de las especies vegetales dentro de las fajinas experimentales, se plantaron plántulas de *S. junceum* en la experimentación indicada en la Tabla 14. En todas se han observado índices de arraigamiento del 100%, con la excepción de las plantas dentro las fajinas rellenas de tierra, donde sólo 1/3 de las plantas sobrevivieron, probablemente debido al deslavado del suelo y la consiguiente exposición del sistema radicular.

El mejor rendimiento de crecimiento se observa para las plantas dentro de las fajinas rellenas de *P. oceanica* (121 cm; Coeficiente de Variación CV =0.07). No fue posible evaluar el crecimiento de *S. junceum* en las enterradas encima de las fajinas, porque las plantas fueron cortadas accidentalmente durante las operaciones de mantenimiento del área.

Tabla 14 *– Arraigo y crecimiento de S. junceum dentro y fuera de las fajinas experimentales*

	Fajinas rellena de los residuos de P. oceanica	Fajinas rellena de tierra	Enterradas encima de las fajinas	Tierra adyacente a la instalación experimental
Arraigamiento [%]	100	33	100	100
Crecimiento [m]	2.85	2.70	nc	2.05

Plantación de *S. junceum* en 100% P. oceanica en marzo de 2017.

Plantación de S. junceum en 100% P. oceanica en noviembre de 2017.

Discusión

La población mundial está en constante expansión y el crecimiento demográfico y económico está provocando la explotación progresiva del medio ambiente y el agotamiento de los recursos naturales (en particular del agua y de la energía), con impactos potencialmente importantes en el cambio global (Vörösmarty *et al*., 2000).

En consecuencia, es urgente y necesaria una gestión más eficiente de los recursos, basada en la reelaboración de objetivos sostenibles de políticas y estrategias ambientales y en la reducción del consumo de recursos, promoviendo la transición de un modelo de economía lineal a uno circular, consistente en un ciclo de desarrollo positivo continuo que preserve y mejore el capital natural, optimizando el uso de los recursos a todas las escalas (MacArthur, 2013). Por lo tanto, comparado con el modelo de economía lineal, en el que la materia prima es considerada sólo en su relación unidireccional hacia el producto, en la economía circular se convierte en parte de un sistema potencialmente en relación con otros (Pellizzari y Genovesi, 2017).

La biomasa derivada de residuos de podas agrícolas, forestales y varadas representa un recurso natural y renovable, presente y disponible en abundancia en el área mediterránea.

Cada año la poda de los viñedos produce una gran cantidad de residuos (sarmientos), que representan una biomasa a desechar; al mismo tiempo, el fenómeno del varamiento de los residuos de *P. oceanica* es percibido como una molestia por los ciudadanos, entrando en conflicto con algunas actividades económicas (turismo, balnearios, etc.). En particular, la presencia de residuos de *P. oceanica* a lo largo de la costa puede reducir el valor turístico de las playas, por lo que los gobiernos locales están obligados a retirar las *banquette* y depositarlas en vertederos.

Desde el punto de vista de la economía circular, esta tesis doctoral propone el uso de materiales orgánicos de desecho, como los residuos de poda de la vid (sarmientos) y los residuos de *P. oceanica* (*banquette*) para la creación de estructuras modulares que se utilizarán en la construcción de obras de Bioingeniería del Paisaje.

Los residuos de poda de vid, ensamblados en forma de fajinas constituyen el elemento base para realizar las obras anti-erosión y de estabilización. A su vez, los residuos de *Posidonia oceánica,* reduciendo el contenido de sales, sirven de sustrato para el crecimiento de las plantas autóctonas.

La propuesta se basa en el uso de materiales adecuados, sostenibles, fácilmente accesibles y de bajo coste. El uso de estos dos materiales que representan residuos de producción agrícola y residuos sólidos muy abundantes en el territorio siciliano y, en general en Mediterráneo, se enmarca en un

uso eficiente de los recursos, en el ahorro económico y energético y en el pleno respeto del medio ambiente.

Como es bien sabido, la Bioingeniería del Paisaje utiliza las plantas como material de construcción en las obras de restauro ambiental y paisajístico. El aumento de la estabilidad de los suelos se consigue, tanto por acciones mecánicas como hidrológicas, aumentando la resistencia a la rotura (Bischetti, 2003) mediante la acción de los sistemas radiculares de la vegetación implantada (Wu *et al*., 1988; Schmidt, 2001).

Las raíces, como resultado de esfuerzos de rotura generadas por el movimiento relativo de dos capas de suelo, se deforman y desarrollan tensión interna (Gray y Sotir, 1996; Simon y Collison, 2002; Gray y Barker, 2004; Pollen *et al*., 2004).

El intervalo de refuerzo va desde unos pocos MPa hasta cientos de MPa. Por lo tanto, el sistema radicular es eficaz tanto para aumentar la resistencia a la rotura como para distribuir, por su elasticidad, las tensiones en el suelo, evitando tensiones y fisuras locales.

La primera experiencia de medición de los valores de resistencia a la tracción de las raíces en Europa se remonta al trabajo de Stiny en 1947 (citado en: Schiechtl, 1991) y luego asumido por Schiechtl (1991). El papel de la vegetación en la mitigación de los fenómenos erosivos y la inestabilidad de las laderas está ampliamente confirmado y las medidas sobre la resistencia a la tracción del sistema radicular de las plantas son numerosas y se llevan a cabo en diferentes partes del mundo (Turmanina 1965; Hathaway y Penny, 1975; Burroghs y Thomas 1977; O' Loughlin y Watson 1979;1981; Watson y O' Loughlin, 1985; Abernethey y Rutherford, 2001; Bischetti *et al*., 2005).

En particular, la estructura y el desarrollo del sistema radicular dependen de la especie y de las características del entorno de crecimiento (condiciones edafoclimáticas, pendiente del sustrato, disponibilidad de agua, fenómenos competitivos, etc.).

Las ensayos mecánicos (tensiones de rotura y módulo de elasticidad) realizados en las probetas de diferentes viñedos muestran que los sarmientos de Cabernet, Grillo y Sirah presentan las mejores características de resistencia a la flexión (mayor rigidez) con una clara prevalencia de Sirah, mientras que los sarmientos de Grecanico, Chardonnay, Catarratto y Nero d' Avola son más deformables. Los valores más altos de las tensiones de rotura se encuentran para el Cabernet.

En general, al relacionar las tensiones de rotura de la muestra con los correspondientes módulos de elasticidad, las mejores características de resistencia y durabilidad son las de Cabernet y

Chardonnay, que pueden ser utilizadas como material de construcción en las obras de Bioingeniería del Paisaje.

Por lo tanto, los sarmientos de Cabernet han sido sugeridos y utilizados para el embalaje de las fajinas en la instalación experimental, junto con el Catarratto, que es el cultivar más cultivado de la región y que, en consecuencia, produce la mayor cantidad de biomasa anual.

Para evaluar la disminución de la salinidad mediante lixiviación natural, se ha estudiado el proceso de infiltración que se produce en los residuos de *P. oceanica* acumulados en los sitios de almacenamiento. La experimentación, realizada en el laboratorio sobre muestras de residuos de *P. oceanica* sometidos a una lluvia de intensidad fija, ha permitido el desarrollo de un modelo teórico simplificado, válido para cúmulos porosos altamente permeables (Baiamonte y Agnese, 2016; Baiamonte, 2016; Assouline, 2005; Brooks y Corey, 1964).

Analíticamente, el modelo matemático propuesto expresa el tiempo de retardo, td, necesario para que el frente de agua, a partir del inicio de la lluvia, alcance la base del cúmulo según la humedad inicial, para las características hidrológicas fijas del medio (Baiamonte *et al*., 2017). El protocolo de ensayo se ha estudiado para ir variando progresivamente las condiciones de humedad inicial sobre la misma muestra, con el fin, de no alterar las características físicas de la propia muestra, haciendo homogéneos los resultados.

Las pruebas realizadas mostraron que la compactación de los residuos de *P. oceanica* desempeñó un papel decisivo en el proceso de infiltración. De hecho, la compactación progresiva ha llevado a un aumento en la densidad aparente, ρ_b y la consiguiente reducción en la conductividad y porosidad del almacenamiento que ha influido en el proceso de infiltración.

Los residuos de *P. oceanica* han dado una respuesta rápida al proceso de infiltración caracterizado por tiempos de retardo bajos con un curso casi uniforme, ya que el contenido inicial de agua varía (el efecto de mayor humedad y el efecto de la compactación son equilibrados). A valores elevados del contenido inicial de agua, predomina el efecto de la compactación, lo que aumenta los tiempos de retardo, dando al material un carácter impermeabilizante. Además, se ha visto que para los residuos de *P. oceanica* el intervalo de tiempos de retardo es limitado cuando las intensidades de lluvia varían (de 20 a 100 mm/h), al contrario de lo que ocurre en el suelo donde la diferente intensidad tiene una influencia considerable en el proceso de infiltración.

La reducción del contenido en sal de los residuos de *P. oceanica* a valores compatibles para su uso en la tierra (Cocozza, 2011) puede conseguirse de forma sostenible mediante lixiviación natural en el almacenamiento al aire libre durante más de un año.

Como alternativa, se puede utilizar un lavado forzado, que requiere volúmenes de agua equivalentes a aproximadamente 10 veces el peso del material tratado.

Aunque el alto contenido de cenizas presente en los residuos de *P. oceanica* da lugar a un contenido reducido en carbono orgánico (Parente y Santamaría, 2009), que puede ser corregido con mezclas apropiadas ricas en nitrógeno (Cocozza *et al.,* 2009), los resultados obtenidos en este trabajo de tesis doctoral avalan su potencial compatibilidad como sustrato de cultivo. Además, el alto grado de porosidad medido en los residuos permite combatir eficazmente los problemas relacionados con la asfixia radicular de la planta (Cocozza *et al.,* 2009).

Los elevados valores de las tensiones de rotura radicular de las especies vegetales consideradas en el estudio (*A. mauritanicus, O. miliaceum, H. coronarium. M. lupulina, L. spartum, B. distachyon, R. officinalis, R. coriaria y S. junceum*) confirman su idoneidad en el campo de la restauración ambiental, estabilización de taludes y prevención de deslizamientos de tierras (Cornelini *et al,* 2008). En particular, *S. junceum* ha demostrado las mejores características biotécnicas en cuanto a la ley de tensión/diámetro y, por lo tanto, ha sido identificada como el material que debe utilizarse para revegetar las fajinas.

Además, la arquitectura general del sistema radicular también es diferente entre las dos posiciones, mostrando una distribución asimétrica de las raíces laterales alrededor de la raíz en las plantas recogidas en una posición de pendiente, simétrica y numéricamente más pequeña para las plantas con posicionamiento plano (Chiatante *et al.,* 2003; Scippa *et al.,* 2005; Lombardi *et al.,* 2017).

En las pruebas de tracción realizadas, en concordancia con el mayor desarrollo y las diferentes arquitecturas radicales, las muestras de *S. junceum* tomadas en posición de pendiente mostraron los mayores valores de tensión de rotura (Preti y Giadrossich, 2009).

En cuanto a los ensayos de campo, las plantas cultivadas sobre el sustrato consistente en residuos de *P. oceanica* mostraron el mayor porcentaje de arraigamiento y un mayor crecimiento de la parte aérea.

Este resultado puede atribuirse a las propiedades físicas (Baiamonte *et al.,* 2017) y a la capacidad aislante de los residuos (Sordina, 1951; Milchakova, 2014). De hecho, la mayor capacidad de drenaje del sustrato en los residuos de *P. oceanica*, detectada durante las pruebas de infiltración, puede haber contribuido positivamente al arraigamiento y desarrollo de la planta.

De hecho, dentro de las fajinas rellenas de tierra, se ha observado que la falta de arraigamiento de dos plantas, se debió al proceso de flujo del agua después de eventos lluviosos que causaron la erosión superficial y el descubrimiento total del sistema radicular.

Además, la capacidad aislante de los residuos de *P. oceanica* se manifestó con una significativa disminución, a nivel del sistema radicular, de las temperaturas máximas y mínimas diarias durante los dos períodos observados (verano y otoño). En particular, durante el período estival, las temperaturas fueron inferiores en 18.5°C en agosto en comparación con el ambiente y superiores en 4.1°C en noviembre, a nivel del sistema radicular de las plantas, plantadas en la fajinas rellenas con residuos de *P. oceanica*. Es interesante observar que el papel de este material en el campo de la construcción como aislante térmico (Sordina, 1951; Milchakova, 2014) es de interés para la aplicación en el campo del cultivo, permitiendo el crecimiento y desarrollo de la vegetación.

Evolución mecanizada y patentada de la fajina

La investigación llevada a cabo durante los tres años de doctorado ha conducido al desarrollo de la técnica mecanizada de las fajinas. La metodología es objeto de presentación de una solicitud de patente (No. 102017000141369) cuyos inventores son Roberta Calvo, Francesco D' Asaro y Giorgio Baiamonte, cuya solicitud ha sido presentada en colaboración con la Universidad de Palermo.

La patente consiste en la realización de un elemento constructivo modular, realizado con materiales eco-compatibles a bajo coste, utilizable en el campo de la Bioingeniería del Paisaje para la realización de: obras de protección anti-erosión, obras de drenaje subterráneo y obras de estabilización lineal de taludes y riberas de ríos.

El elemento básico de la obra (módulo) es una fajina montada mecánicamente, con materiales orgánicos de residuos de producción agrícola, que se puede revegetar con un sustrato constituido por otros residuos orgánicos como los residuos de *P. oceanica*.

El material utilizado para la realización del elemento modular consiste en residuos de poda de la vid (sarmientos). Este material tiene todas las características de la eco-compatibilidad: sin prácticamente coste alguno, es un material renovable y fácil de encontrar. La reutilización de este material de madera como alternativa a la quema, el enterramiento o los vertederos representa una importante ventaja ecológica, incluida la limitación de las emisiones de CO_2 a la atmósfera.

La gran disponibilidad territorial de este material es importante para la producción del producto, sobre todo en Italia pero también en Europa y especialmente en el área mediterránea.

El embalaje de los módulos se realizará mecánicamente con máquinas agrícolas especializadas ya existentes en el mercado. Más concretamente, se trata de mini máquinas específicas para sarmientos del tipo CAEB International Quick Power (Fig. 61) que operan en viñedos a diferentes distancias entre hileras (de 85 a 160 cm y más).

La bala de sarmientos producida, de 40 cm de diámetro y 60 cm de largo, puede ser envuelta con una manta de fibra natural o malla de polipropileno.

Su densidad puede variar utilizando un selector especial.

Los módulos destinados a constituir la obra "muerta", sin vegetación, tendrán mayor densidad, asegurando mayor resistencia y durabilidad.

Los módulos "vivos", con vegetación, serán embalados a baja densidad para permitir el posterior llenado con materiales orgánicos de desecho que constituirán el sustrato de crecimiento (alternativo a la tierra) para la posterior siembra o plantación de especies herbáceas o arbustivas autóctonas.

En particular, se utilizará como material de sustrato una mezcla de residuos de *P. oceanica* y compost, así como sustancias adherentes orgánicas. El módulo se rellenará en forma líquida por inmersión o por humectación externa (tipo hidrosiembra).

Figura 61 *– a) Máquina específica para sarmientos CAEB International Quick Power; b) Máquina en funcionamiento.*

Las obras lineales se realizarán conectando los módulos individuales longitudinalmente con un cable de fibra vegetal, metálica o sintética (Fig. 62). De esta manera, al anclar los extremos del cable de vinculación al suelo, la estructura lineal podrá soportar el empuje de la tierra a alturas limitadas. El cable también se puede conectar en puntos intermedios para reducir la luz de los vanos (Fig. 63).

En particular, el sistema de vinculación consiste en un cable de par trenzado, insertado con aguja neumática en el interior del módulo (Fig. 62), dejando un anillo de conexión en un lado y dos cables de vinculación en el otro.

Figura 62 *– Detalle de conexión de dos módulos de fajina.*

Una vez conectados varios módulos, la compresión entre ellos se puede ajustar tensando el extremo del cable de vinculación.

Las fajinas se ensamblarán en su lugar y se pueden conectar 4-5 módulos (2,4 - 3 m) antes del transporte.

Las fajinas se pueden completar con la adición de elementos subterráneos de drenajes, normalmente dispuestos en la estructura lineal, que mejorarán la estabilidad (debido al efecto de fricción de los elementos subterráneos) y el efecto estabilizador de la obra (debido al drenaje).

El sistema de conexión de los módulos no sólo permite construir estructuras lineales, sino también obras con un sistema cerrado (por ejemplo, sistemas de anillos).

Las Figuras 64 y 65 muestran dos formas de realización del trabajo de construcción modular, según la invención, en la que los módulos pueden conectarse entre sí de forma cerrada.

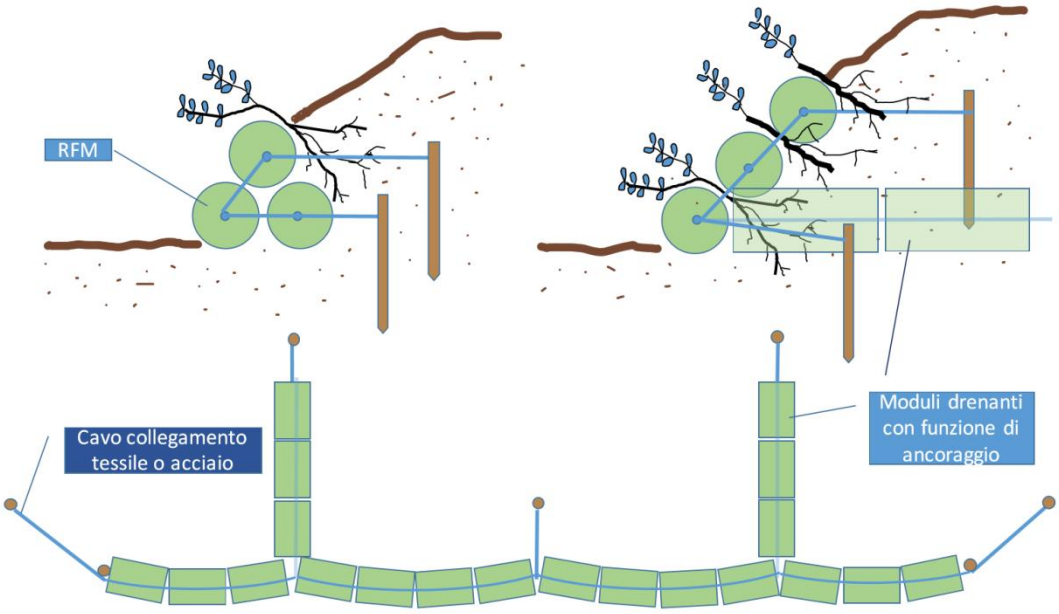

Figura 63 *– Dos esquemas de fajinas en sección (arriba) y disposición planimétrica (abajo).*

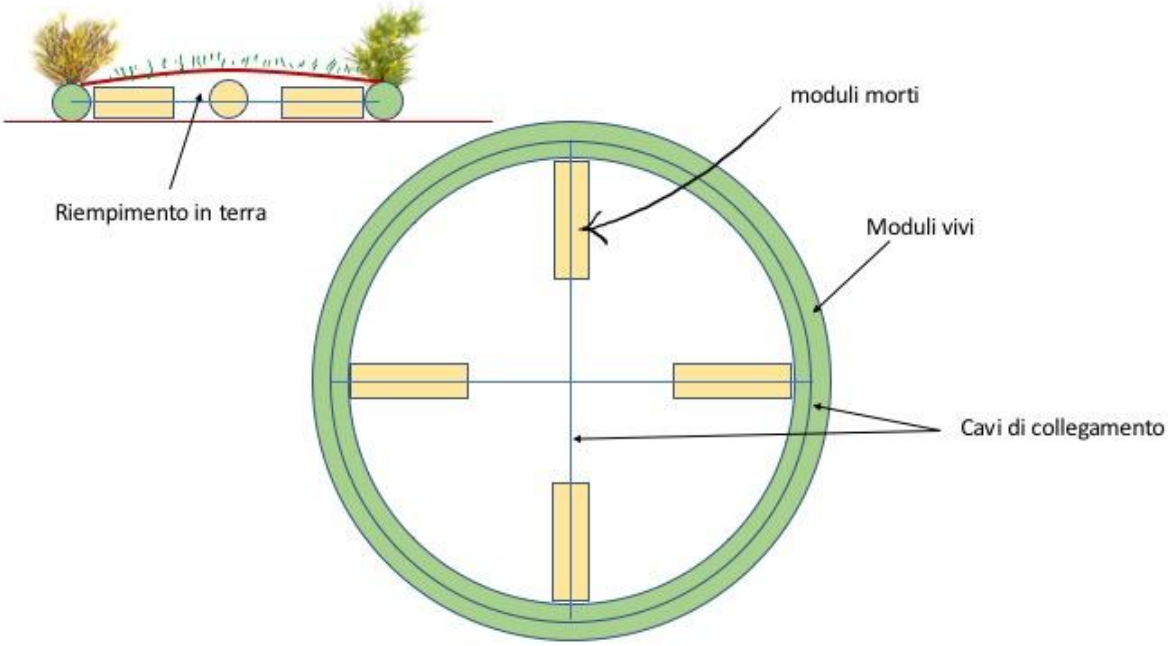

Figura 64 *– Esquema de fajinas en forma cerrada (arriba) y disposición planimétrica (abajo).*

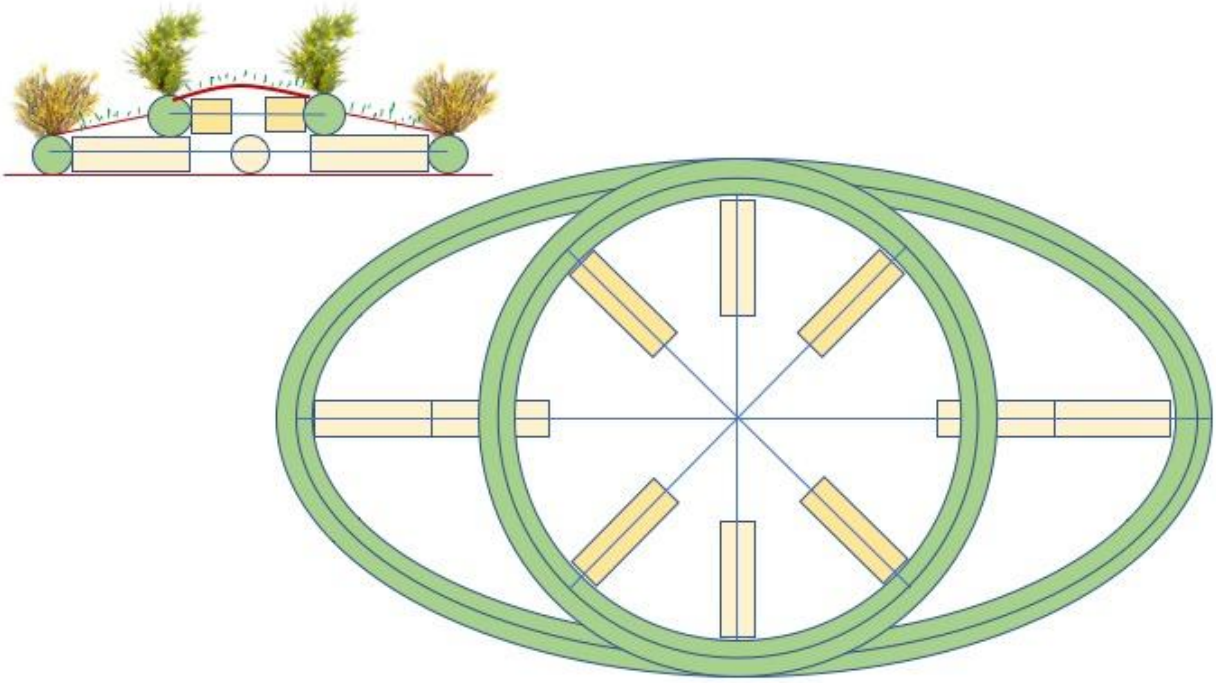

Figura 65 *– Esquema de fajinas en forma cerrada (arriba) y disposición planimétrica (abajo).*

Conclusiones

En el marco de la sostenibilidad de los recursos y la correcta gestión de los residuos, esta tesis doctoral ha probado y validado con éxito el papel de los residuos orgánicos, como los sarmientos y los residuos de *P. oceanica*, en el campo de la Bioingeniería del Paisaje para el restauro del territorio y del paisaje.

Por lo tanto, se ha identificado un nuevo uso para estos materiales, que de otro modo tendrían que ser depositados en vertederos.

Los resultados encontrados, dan a los sarmientos excelentes cualidades físicas y mecánicas. Los dos cultivares seleccionados, Catarratto y Cabernet, son idóneos para el embalaje de fajinas, la obra más antigua y utilizada en el campo de la Bioingeniería del Paisaje, desempeñando un papel de apoyo al crecimiento de la vegetación.

El único límite a la reutilización de los residuos de *P. oceanica*, por ejemplo como medio de cultivo, es el alto contenido de sal. Sin embargo, se ha visto cómo la reducción del contenido de sal puede llevarse a cabo de forma sostenible, como alternativa al lavado forzado, creando un lugar de almacenamiento y depositando los residuos de *P. oceanica* al aire libre, bajo la acción de las lluvias para una escorrentía natural.

Como sustrato de cultivo, los residuos de *P. oceanica* poseen también otras propiedades como un alto grado de porosidad que reduce el fenómeno de asfixia radicular, que permite un buen drenaje y que establece condiciones óptimas para el arraigamiento de la vegetación.

La validación experimental de esta característica se obtuvo a partir de instalación experimental, donde, precisamente en correspondencia con las fajinas rellenas de residuos de *P. oceanica*, se registraron los valores más altos de arraigamiento de la planta y el mayor desarrollo de la parte aérea.

El control del microclima dentro las fajinas mostraba la alta capacidad de aislante térmico de los residuos de *P. oceanica*, que se manifestaba con una significativa atenuación, a nivel del sistema radicular, de las temperaturas máximas y mínimas diarias en los dos períodos considerados (verano y otoño).

A partir del análisis de las tensiones de rotura de raíces de diferentes especies vegetales autóctonas, *S. junceum* ha proporcionado los mejores resultados de biotécnicas al solicitar su uso como parte viva de la obra.

También se detectó una mayor resistencia a la rotura de raíces en plantas con posiciones de pendiente. Esta característica favorece el desarrollo de una pared de fajinas, dispuestas en escaleras, para la mejora de la estabilidad de taludes.

Por último, el estudio ha llevado al perfeccionamiento de la técnica de las fajinas mecanizadas cuyas metodologías están cubiertas por una patente. Las ventajas de la nueva metodología sobre las tecnologías actuales pueden resumirse de la siguiente manera:

- El producto propuesto hace "estructural", con un sistema de conexión de los módulos, una obra frecuentemente utilizada en Bioingeniería del Paisaje que no es estáticamente resistente a las acciones de empuje de las tierras.
- Mecanización de la producción de productos modulares, que en la práctica actual sólo permite el ensamblaje a mano, con la consiguiente reducción del tiempo de fabricación y los costes asociados.
- Reutilización sostenible de residuos orgánicos con consecuente economía de la construcción.
- Reducción del tiempo de instalación de las estructuras de protección hidrogeológica.

La innovadora técnica propuesta implica, por tanto, la construcción de una estructura modular realizada con materiales ecológicos a bajo coste: los residuos de poda de la vid (sarmientos) y los residuos de *P. oceanica* (*banquette*).

Los residuos de poda de vid y los residuos de *P. oceanica* también se utilizaron para un proyecto, financiado por la Comunidad Europea, en el Municipio de Custonaci titulado " *Primi interventi finalizzati a contenere il fenomeno della desertificazione del territorio Comunale Parco sub-urbano Portella del Cerriolo* ". Recientes controles de calidad por parte de la Unión Europea sobre las obras, realizadas con los materiales de desecho, han demostrado los excelentes resultados conseguidos por el proyecto. Por esta razón, la UE ha presentado la candidatura del proyecto del Parque de *Portella del Cerriolo* como *best practices* en el área mediterránea para luchar contra el fenómeno de la desertización.

El uso de estos dos materiales representa, residuos de producción agrícola y residuos sólidos muy abundantes en el territorio siciliano y, en general en el Mediterráneo, se integra en el reúso eficiente de los recursos locales, en el ahorro económico y energético, y en el respecto del medio ambiente.

Ringraziamenti

Si ringraziano: la Tenuta Marino Feudo di Montagnola, l'impresa vitivinicola Corbera in Contrada Isabella, l'impresa vitivinicola Alto Belice di S. Cipirriello e l'impresa vitivinicola Barbera per aver fornito a titolo gratuito i residui di potatura della vite.

Si ringrazia l'Ing. Gianluigi Pirrera per aver fornito a titolo gratuito i residui di *Posidonia oceanica* ed aver autorizzato il prelievo dei residui di *Posidonia oceanica* dal sito di stoccaggio del Parco suburbano di Custonaci.

Vorrei infine ringraziare il prof. Francesco D'Asaro ed il prof. Luciano Gristina, rispettivamente tutor e cotutor di questa tesi, per il supporto ed il prezioso aiuto fornitomi durante tutte le fasi del mio dottorato di ricerca.

Bibliografía

Abernethy B., Rutherfurd A.I., 2001. The distribution and strength of riparian tree roots in relation to riverbank reinforcement. *Hydrological Processes*. 15: 63-79.

Agri Istat, 2017. (http://agri.istat.it/sag_is_pdwout/jsp/NewDownload.jsp?id=15A|21A|30A)

Asaro I., Spinelli M. 2012. Case Study SLCA: Biomattone Equilibrium. Product Lifecycle Management.

Assouline, S., 2005. On the relationships between the pore size distribution index and characteristics of the soil hydraulic functions. *Water resources research,* 41(7): W07019-1.

Baiamonte, G., 2016. Simplified model to predict runoff generation time for well-drained and vegetated soils. J Irrig Drain *E-ASCE*, 142(11), Doi:10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001072, 04016047.

Baiamonte, G., Agnese, C., 2016. Quick and Slow Components of the Hydrologic Response at the Hillslope Scale J Irrig Drain *E-ASCE*, 142(10), Doi:10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001053, 04016038.

Baiamonte G., Calvo R., D'Asaro F., 2017. Processi di infiltrazione in un mezzo altamente poroso: misure sperimentali e impiego di un modello semplificato a base fisica. Quaderni di Idronomia Montana. *EdiBios*, 35.

Battiato, A., Cinelli, F., Cormaci, M., Furnari, G., Mazzella, L., 1982. Studio preliminare della macroflora epifita della *Posidonia oceanica* (L.) Delile di una prateria di Ischia (Golfo di Napoli). *Nat. Sicil.,* 1: 15-27.

Brooks, R. and A. Corey, A.,1964. Hydraulic properties of porous media, *Hydrology Paper*, Colorado State University. 3:1-27

Bianchi D., Zanchini E., 2014. Rapporto Ambiente Italia Ambiente in Europa- *Edizioni Ambiente*.

Bischetti G. B., 2003. Il ruolo della vegetazione nella stabilità dei versanti. Quaderni della scuola di ingegneria naturalistica. Consorzio Parco Monte Barro, Lecco. 5:

Bischetti G. B., Chiaradia E. A., Simonato T., Speziali B., Vitali B., Vullo P., Zocco A., 2005. Root strenght and root area ratio of forest species in Lombardy (Northern Italy). *Plant and Soil*. 278:11-22.

Boccalaro F., 2012. Difesa Delle coste e ingegneria naturalistica. Manuale di ripristino degli habitat lagunari, dunari, litoranei e marini. *Dario Flaccovio Editore s.r.l.* pp 560. ISBN 978-88-579-0109-1.

Borg, J.A., Schrembi, P.J., 1995. The state of Posidonia oceanica (L.) Delile meadows in the Maltese Islands (Central Mediterranean). Rapport P.V. Réunion de la Commission International pour l'Exploration Scientifique de Méditerranée. 34: 1-123.

Boudouresque C.F., Meinesz A.,1982. Découverte de l'herbier de Posidonie. Cah. Parc. Nation. *Port-Cros, Fr.,* 4: 1-79.

Boudouresque, C. F., Bernard, G., Bonhomme, P., Charbonnel, E., Diviacco, G., Meinesz, A., Tunesi, L., 2006. Preservation and conservation of the seagrass Posidonia oceanica. Hotel de Rgion- Conseil Regional Provence-Alpes-Cote d'Azur. *Accord Ramoge*. 197: 1-202

Burroughs E. R. Jr., Thomas B. R.,1977. Declining root strength in Douglas-fir after felling as a factor in slope stability. *USDA Forest Service Research Paper* INT-190, 27.

Calvo R., Pirrera G., D'Asaro F., 2016. Materiales orgánicos de reúso para las obras de bioingeniería del paisaje. *IX Congreso Internacional de Bioingeniería del Paisaje*. *Donostia San Sebastian*, 9-11 novembre 2016, pag 36.

Calvo R., Schicchi R., D'Asaro F., 2017. Slope effect on *Spartium junceum* root tensile strength. *3rd International Symposium of Soil and Water Bioengineering*. *Ma.T.E.R.: Materials and Techniques in Ecological Restoration*. October 13-15 2017, Sant'Agata di Militello (Messina-Sicily), pag. 3.

Calvo S., Tomasello A., Di Maida G., Pirrotta M., Buia M. C., Cinelli F., Cormaci M., Furnari G., Giaccone G., Luzzu F., Mazzola A., Orestano C., Procaccini G., Sarà G., Scannavino A., Vizzini S., 2010. Seagrasses along the Sicilian coasts. *Chemistry and Ecology*, 26: 249-266.

Calvo S., Scannavino A., Luzzu F., Di Maida G., Pirrotta M., Orestano C., Tomasello A., 2014. Tecnica di reimpianto mediante supporto biodegradabile. In: Manuale e Linee Guida, ISPRA, 106/2014, "Conservazione e gestione della naturalità degli ecosistemi marino-costieri. Il trapianto delle praterie di Posidonia oceanica", 47-51.

Chiatante D., Sarnataro M., Fusco S., Di Iorio A., Scippa G. S., 2003. Modification of root morphological parameters and root architecture in seedlings of Fraxinus ornus L. and Spartium junceum L. growing on slopes, Plant Biosystems - *An International Journal Dealing with all Aspects of Plant Biology*, 137:47-55. DOI: 10.1080/11263500312331351321.

Cocozza, C., Mininni, C., Zaccone, C., Miano, T., Santamaria, P., Parente, A.,2009. Il processo di compostaggio applicato ai residui di posidonia spiaggiata. *Il caso dei residui spiaggiati di Posidonia oceanica: da rifiuto a risorsa*, pp:121-139.

Cocozza C., Parente A., Zaccone C., Mininni C., Santamaria P., Miano T., 2011. Chemical, physical and spectroscopic characterization of Posidonia oceanica (L.) Del. residues and their possible recycle *Biomass and Bioenergy*, 35 (2), pp. 799-807.

Coldiretti, 2012. http://www.coldiretti.it/archivio/vino-italia-sorpassa-francia-e-primo-produttore-mondiale

Cornelini P., Federico C., Pirrera G., 2008. Arbusti autoctoni mediterranei per l'Ingegneria Naturalistica. Primo contributo alla morfometria degli apparati radicali, Azienda Regionale Foreste Demaniali Regione Siciliana, Collane Sicilia Foreste. 40: 223-278.

D'Asaro F., Calvo R., 2017. Da materiali di scarto a risorsa nelle opere di ingegneria naturalistica. *Quaderni di Idronomia Montana*. EdiBios, vol. 35.

Dati Ass. Reg. Risorse Agricole e Alimentari U.O.30, 2011. Interventi OCM vitivinícola.

Den Hartog C., 1970. The seagrasses of the world. North-Holland Publishing Company Amsterdam 59:1-272.

De Lumeley H., Pillard B., Pillard F. 1969. L'habitat et les activités de l'homme du Lazaret. Une cabanne acheuléenne de la grotte du Lazaret (Nice). Mém. Soc. Préhits France. 7:183-222.

Duarte C.M., 2004. How can beached be managed with respect to seagrass litter? In: European seagrasses an introduction to monitoring and management. M&MS project, Copenaghen, Danimarca, 83-84.

Duarte, C. M., Losada, I. J., Hendriks, I. E., Mazarrasa, I., Marbà, N., 2013. The role of coastal plant communities for climate change mitigation and adaptation. Nature Climate Change, 3.11: 961-968.

Eynard I., Dalmasso G., 2005. Viticoltura Moderna. Manuale pratico, Milano, *Hoepli*. pp 768

Enea, 2009. Rilievo indici di relazione tra produzioni agricole e biomassa residuale associata, analisi del mercato della biomassa residuale nelle province delle regioni Molise, Campania, Puglia, Basilicata, Calabria, Sicilia, Sardegna. http://aida.casaccia.enea.it/aida/file/RSE50.pdf

Enea, 2010. Progetto Biomasse Enama 2011 "Atlante delle Biomasse". www.atlantebiomasse.enea.it

Ennos A.R., 1994 The biomechanics of root anchorage. *Biomechanics*. 2: 129-137.

Eropean Federation for Soil and Water Bioengineering, 2015. European Guidelines for Soil and Water Bioengineering.

Francour, P., 1997. Fish assemblages of *Posidonia oceanica* beds at Port- Cros (France, NW Mediterranean): assessment of composition and long- term fluctuations by visual census. *Marine Ecology*.18.2: 157-173.

Gambi, M. C., Barbieri, F., Bianchi C. N., 2009. New record of the alien seagrass Halophila stipulacea (Hydrocharitaceae) in the western Mediterranean: a further clue to changing Mediterranean Sea biogeography. *Marine Biodiversity Records*. *2*:1-7 doi:10.1017/S175526720900058X

Gray, D. H., Sotir, R. B.,1996. Biotechnical and soil bioengineering slope stabilization: a practical guide for erosion control. *John Wiley & Sons*.

Gray, D. H., Barker, D., 2004. Root-Soil Mechanics and Interactions. *Riparian Vegetation and Fluvial Geomorphology*. *8*:113-123

Guillén, J., Martínez- Vidal, J., Triviño, A., Soler, G., Fages, E., Torre, L.,2014. Guía de buenas prácticas para la gestión, recogida y tratamiento de los arribazones de algas y plantas marinas en las costas. Proyecto Seamatter LIFE11 ENV/ES/000600. Ed. Instituto de Ecología Litoral, El Campello, 24 pp.

Hakeem K.R.,2014. Biomass and bioenergy: processing and properties. *Springer*. pp365

Hathaway R.L., Penny D., 1975. Root strength in some Populus and Salix clones. *New Zealand Journal of Botany*. 13: 333-344.

INFC, 2005. Inventario Nazionale delle foreste e dei serbatoi forestali di carbonio Corpo forestale dello stato. http://www3.istat.it/istat/eventi/2007/forestali/inventario_foreste_serbatoi_carbonio.pdf

Istat, 2014. https://www.enama.it/userfiles/PaginaSezione/files/p1c2.pdf

Istat, 2010. http://dati-censimentoagricoltura.istat.it/Index.aspx

Kolesnikov, V. A., 1971. The root system of fruit plants. No.Ed. 2 pp.269

Kokutse, N., Fourcaud, T., Kokou, K., Neglo, K., Lac, P., 2006. 3D numerical modelling and analysis of the influence of forest structure on hill slopes stability. *Interpraevent*. pp. 561-567.

Ligato D., Marasciulo T., Pascarella F., Guerra M., 2002. Atlante delle opere di sistemazione dei versanti. APAT, Manuali e linee guida 10/2002., ISBN 88-448-0286-6.

Lombardi, F., Scippa, G. S., Lasserre, B., Montagnoli, A., Tognetti, R., Marchetti, M., Chiatante, D., 2017. The influence of slope on Spartium junceum root system: morphological, anatomical and biomechanical adaptation. *Journal of plant research*, *130*.3:515-525.

Mazzella, L., Buia M.C., Gambi M.C., Lorenti .M, Russo G.F., Scipione M.B., Zupo V., 1992. Plant-animal trophic relationships in the Posidonia oceanica ecosystem of the Mediterranean Sea. *Plant-animal Interactions in the Marine Benthos: Systematics Association*, *46*:165-187.

MacArthur, E., 2013. Towards the circular economy. *J. Ind. Ecol*, 23-44.

McRoy, C. P., Helfferich, C.,1980. Applied aspects of seagrasses. *Handbook of seagrass biology: an ecosystem perspective*. pp 297-343.

Milchakova, N. A., Böer, B., Boyko, L. I., Mikulich, D. V., 2014. The chemical composition and technological properties of seagrasses a basis for their use. *Sabkha ecosystems*. 47:313-323

Mininni C., Grassi F., Traversa A., Cocozza C., Parente A., Miano T., Santamaria P., 2015. Posidonia oceanica (L.) based compost as substrate for potted basil production *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 95 (10), pp. 2041-2046

Montesano F.F., Parente A., Grassi F., Santamaria P, 2014. Posidonia-based compost as a growing medium for the soilless cultivation of tomato *Acta Horticulturae*, 1034, pp. 277-282.

O'loughlin C.L., Watson A.J., 1979. Root-wood strength deterioration in Radiata Pine after clearfelling. *New Zealand Journal of Forestry Science*. 39.3: 284-293.

Oplatka M., Dietz M., Leuzinger Y., Reussilles L., Palmeri F., Dibona L., Frossard P. A.,1996. Dictionary of Soil Bioengineering. *Springer Fachmedien Wiesbaden*. pp. 241 DOI:10.1007/978-3-322-91992-2

Parente A., Mininni C., Montesano F.F., Santamaria P., 2009. L'impiego dei residui di posidonia come substrato di coltivazione. *Il caso dei residui spiaggiati di Posidonia oceanica: da rifiuto a risorsa*, 141-157.

Pasqualini, V., Pergent-Martni, C., Clabaut, P., Pergent, G., 1998. Mapping of *Posidonia oceanica* using aerial photographs and side-scan sonar: Application off the islands of Corsica (France). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 47: 359–367.

Pastena B., 2009. La civiltà della vite in Sicilia. Regione Siciliana, Istituto regionale della vite e del vino. pp 70

Pellizzari A., Genovesi E., 2017. Neomateriali nell'Economia Circolare. Edizioni Ambiente pp 207

Pergent, G., 1993. L'herbier a *Posidonia oceanica* (L.) Delile. Approche structurale, fonctionnelle et appliquée. Diplome d'Habilitation a Diriger des Recherches. Université de Corse, France.

Pergent-Martini C., 1994. Impact d'un rejet d'eaux usées urbaines sur l'herbier à Posidonia oceanica, avant et après la mise en service d'une station d'épuration. Thèse Doctorat, Univ. Corté, Fr.: 1-191.

Pergent G., Pergent-Martini C., Boudouresque C. F., 1995. Utilisation de l'herbier a Posidonia oceanica comme indicateur biologique de la qualité du milieu littoral en Méditerranée: état de connaissances. Mésogée. 54: 3-27.

Pirrera G., Sauli G., Calvo R., Amato F., D'Asaro F., 2016 Hidrosiembra paisajística. IX Congreso Internacional de Bioingeniería del Paisaje, Donostia San Sebastian, 9-11 novembre 2016, pag. 29.

Pollen N., A., Collison A., Collison S., 2004. Advances in Assessing the Mechanical and Hydrologic Effects of Riparian Vegetation on Streambank Stability, in Riparian Vegetation and Fluvial Geomorphology. *Water Science and Application* 8:113-123

Preti, F., Giadrossich, F., 2009. Root reinforcement and slope bioengineering stabilization by Spanish Broom (*Spartium junceum* L.). *Hydrology and Earth System Sciences*.13.9:1713-1726

Schiechtl H.M., 1991. *Bioingegneria forestale*. Castaldi (Feltre).

Schiechtl H. M., Stern R., 1992. *Ingegneria naturalistica*. *Manuale delle opere in terra*. Castaldi (Feltre).

Schmid K.M., Roering J.J., Stock J. D., Dietrich W. E., Montgomery D.R. Schaub T., 2001. The variability of root cohesion as an influence on shallow landslide susceptibility in the Oregon Coast Range. *Canadian Geotechnical Journal*. 38:995-1024

Scippa, G. S., Di Michele, M., Di Iorio, A., Costa, A., Lasserre, B., Chiatante, D., 2005. The response of *Spartium junceum* roots to slope: anchorage and gene factors. *Annals of botany*. *97*.5: 857-866.

Simon A., Collison J.C., 2002. Quantifying the Mechanical and Hydrologic Effects of Riparian Vegetation on Streambank Stability. *Earth Surface Processes and Landforms*. 27: 527-546

Statista 2017, https://www.statista.com

Smit A.L., Bengough AG., Engel C., van Noordwijk M., Pellerin S., van de Geijn SC., 2000. Root methods: a handbook. *Springer Science & Business Media*. pp 587

Sordina, J.,1951. Marine plants of Greece and their use in agriculture. *Prak*. *Hell*. *Hydrobiol*. *Inst*. *5*:73-124.

Tackolom V., Drar M., 1954. Flora of Egypt: Angiospermae, Part Monocotyledones: Liliaceae-Musaceae. *Bull*. *Fac*. *Sci*., *Egypte*. 30:1-648.

Terrados, J., Borum, J., 2004. Why are seagrasses important?-Goods and services provided by seagrass meadows. *European seagrasses: an introduction to monitoring and management*. pp 8-10.

Trotter, A., 1915. Flora economica della Libia: statistica illustrata delle piante coltivate e delle spontanee utili.

Turmanina V., 1965. On the strength of tree roots . *Bull*. *Moscow Soc*. *Naturalists, Biol*. 70.5: 36-45.

Tuttolomondo, T., La Bella, S., Leto, C., Gennaro, M., Calvo, R., D'Asaro, F., 2017. Biotechnical characteristics of root systems in erect and prostrate habit *Rosmarinus officinalis L.* accessions grown in a mediterranean climate. *Chemical Engineering Transactions Italian Association of Chemical Engineering – AIDIC*. 58:769-774 DOI :10.3303/CET1758129.

Vörösmarty C.J., Green P., Salisbury J., Lammers R.B., 2000. Global Water Resources: Vulnerability from Climate Change and Population Growth. *Science*, 289.5477: 284-288.

Violante P., 2000. *Metodi di analisi chimica del suolo*. Metodi analitici per l'agricoltura.1ª edizione 2000. Codice ISBN: 9788846422408. pp. 536.

Watson A.J., O'loughlin C., 1985. Strength, and biomass of manuka roots and their influence on slope stability. *New Zeland Journal of Forestry Science*. 15.3: 337-348

Wu T. H. Beal P.E., Lan C., 1988. In situ shear tests of soil- root system. *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*. 114:1376-1394