

# Ανοικτό Πανεπιστήμιο Κύπρου

Σχολή Θετικών και Εφαρμοσμένων Επιστημών

Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Σπουδών  
*Διαχείριση και Προστασία Περιβάλλοντος*

## Μεταπτυχιακή Διατριβή



Η παραγωγικότητα των δασών υπό την πιθανή επίδραση  
της πρόσφατης αύξησης του CO<sub>2</sub> της ατμόσφαιρας του  
πλανήτη

Μάριος Μαλάης

Επιβλέπων Καθηγητής  
Δρ. Δημήτριος Σαρρής

Δεκέμβριος 2018

# **Ανοικτό Πανεπιστήμιο Κύπρου**

**Σχολή Θετικών και Εφαρμοσμένων Επιστημών**

**Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Σπουδών**  
*Διαχείριση και Προστασία Περιβάλλοντος*

## **Μεταπτυχιακή Διατριβή**

**Η παραγωγικότητα των δασών υπό την πιθανή επίδραση της πρόσφατης αύξησης του CO<sub>2</sub> της ατμόσφαιρας του πλανήτη**

**Μάριος Μαλάης**

**Επιβλέπων Καθηγητής**  
**Δρ. Δημήτριος Σαρρής**

Η παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή υποβλήθηκε προς μερική εκπλήρωση των απαιτήσεων για απόκτηση μεταπτυχιακού τίτλου σπουδών στη Διαχείριση και Προστασία Περιβάλλοντος από τη Σχολή Θετικών και Εφαρμοσμένων Επιστημών του Ανοικτού Πανεπιστημίου Κύπρου.

**Δεκέμβριος 2018**



## Περίληψη

Η επίδραση της αύξησης της συγκέντρωσης του ατμοσφαιρικού CO<sub>2</sub> στην παραγωγικότητα των δασών αποτελεί ένα από τα ζητήματα της κλιματικής αλλαγής που έχει απασχολήσει την επιστημονική κοινότητα.

Στόχος της διατριβής είναι η διερεύνηση των τάσεων που παρουσιάζονται στη βιβλιογραφία και τον αντίκτυπο αυτών στην επιστημονική κοινότητα. Περαιτέρω να αναλυθεί ο τρόπος που εξετάζεται το ζήτημα στις έρευνες και οι παράμετροι που έχουν ληφθεί υπόψη στον υπολογισμό της επίδρασης της πρόσφατης αύξησης της συγκέντρωσης του CO<sub>2</sub> στην παραγωγικότητα των δασών.

Η παραγωγικότητα των δασών πέραν από την αύξηση του ατμοσφαιρικού CO<sub>2</sub> δύναται να επηρεαστεί μεταξύ άλλων από την άνοδο της θερμοκρασίας, τις διακυμάνσεις των κατακρημνίσεων, το φως, τη πυκνότητα της βλάστησης, τον προσανατολισμό, την ηλικία του πληθυσμού, τη θέση του πληθυσμού στη γεωγραφική κατανομή του είδους ως προς το γεωγραφικό πλάτος και το υψόμετρο, τη γονιμότητα του εδάφους ακόμη και από τον εξειδικευμένο μηχανισμό αύξησης για κάθε είδος βλάστησης δηλαδή, φωτοσύνθεσης, μεταβολισμού και κυτταρικής διαίρεσης. Οι παράμετροι αυτοί από μόνοι τους ή σε συνέργεια δύναται να επηρεάσουν την πιθανή αυξομείωση της παραγωγής των δασών.

Ως εκ τούτου έγινε αναζήτηση των εργασιών που έχουν μελετήσει την επίδραση της αύξησης του CO<sub>2</sub> στην ατμόσφαιρα στην παραγωγικότητα των δασών. Η αναζήτηση των εργασιών έγινε μέσω της μηχανής αναζήτησης του Google Scholar. Χρησιμοποιήθηκαν οι λέξεις κλειδιά CO<sub>2</sub>, fertilization, water use efficiency (WUE), productivity, growth, drought, forest. Καταγράφηκαν οι δείκτες Αναφορά Δημοσίευσης, Impact Factor, Ημερομηνία, Αριθμός Αναφορών, Τοποθεσία, Μεθοδολογία, Είδος Δέντρων / Βλάστησης, Λέξη κλειδί, Αποτέλεσμα, Υψόμετρο και Συντεταγμένες.

Για να προσδιοριστούν οι περιοριστικοί παράγοντες που δύναται να επηρέασαν το αποτέλεσμα των εργασιών, διερευνήθηκαν οι τάσεις της θερμοκρασίας και των κατακρημνίσεων στις θέσεις μελέτης. Έγινε έρευνα για τη γεωγραφική κατανομή των ειδών που έχουν μελετηθεί και κατάταξη τους ως προς τα όρια της φυσικής εξάπλωσης τους και τα θερμοόρια τους.

Από την ανάλυση των δεδομένων προκύπτει ότι οι εργασίες που δεν δείχνουν επίδραση της αύξησης του ατμοσφαιρικού CO<sub>2</sub> στην παραγωγικότητα των δασών έχουν μεγαλύτερο αντίκτυπο στην επιστημονική κοινότητα, γεγονός που θέτει σοβαρό προβληματισμό σχετικά με τη βαρύτητα των αποτελεσμάτων των εργασιών που δείχνουν θετική επίδραση.

Αναζητήθηκαν και αναλύθηκαν οι παράμετροι της θερμοκρασίας, των κατακρημνίσεων, του υψομέτρου και της γεωγραφικής κατανομής του είδους που έχει μελετηθεί στις εργασίες. Έγινε αντιπαραβολή των δεδομένων αυτών με τα αποτελέσματα των εργασιών όπου προέκυψαν αντιθέσεις. Συνεπώς δύναται να ειπωθεί ότι υπάρχουν αδυναμίες στα αποτελέσματα των εργασιών και επομένως ενδείξεις για παρερμηνεία των ευρημάτων τους.

Ανευρέθηκε ότι στις πλείστες εργασίες που καταλήγουν σε θετική επίδραση της αύξησης του CO<sub>2</sub> στην παραγωγικότητα των δασών, δεν λαμβάνονται υπόψη τα δεδομένα θέσης μελέτης του είδους δηλαδή οι συντεταγμένες, το υψόμετρο και η σχέση του πληθυσμού που εξετάστηκε, στη γεωγραφική κατανομή του είδους, παρόλο που δίνονται στις εργασίες. Δεν συνυπολογίζεται η επίδραση των παραμέτρων της αλλαγής της θερμοκρασίας και της διακύμανσης των κατακρημνίσεων. Δεν εξετάζεται ο εξειδικευμένος μηχανισμός αύξησης του είδους προς μελέτη, γεγονός που θα δείκνυε με ποιο τρόπο θα αντιδρούσε το είδος αυτό στη συγκεκριμένη θέση μελέτης και ποιοι θα ήταν οι περιοριστικοί παράγοντες.

Συνεπώς οι εργασίες που έχουν ως αντικείμενο μελέτης, την επίδραση της αύξησης της συγκέντρωσης του CO<sub>2</sub> στην παραγωγικότητα των δέντρων, δεν πρέπει να συνδέουν την όποια αύξηση ευρεθεί, αποκλειστικά με την αύξηση του CO<sub>2</sub>. Ο μηχανισμός αύξησης των δέντρων είναι περίπλοκος στον οποίο επενεργούν πλήθος παραγόντων γεγονός που απαιτεί εξειδικευμένη ανάλυση για κάθε είδος στη συγκεκριμένη θέση που μελετάται. Τελικώς χρειάζεται να γίνουν περαιτέρω έρευνες που να διερευνούν τον τρόπο που επιδρά η κλιματική αλλαγή στην παραγωγικότητα των δασών.

## **Abstract**

The effect of the increase of CO<sub>2</sub> concentration in the atmosphere, on the forests' productivity, has been one of the issues related to climate change that has concerned the science community.

The aim of the dissertation is the research of the trends presented in the bibliography and their impact on the science community. Furthermore, to analyse the way that the issue is studied in the researches and the parameters that have been considered to estimate the impact of the recent rise of the CO<sub>2</sub> concentration on the forests' productivity.

Apart from the rise of the CO<sub>2</sub> concentration in the atmosphere, the productivity of the forests can be influenced, among others, by the increase of the temperature, the fluctuations of the precipitation, the light, the density of plantation, the orientation, the age of population, the position of the population at the geographical distribution of the species in relation to the latitude and the altitude, the fertility of the soil and even by the specialised growth mechanism for each kind of plant, namely, photosynthesis, metabolism and cell division. These parameters on their own or in combination can influence the possible fluctuation of the forests' productivity.

Therefore, papers, which have studied the impact of the rise of the CO<sub>2</sub> concentration in the atmosphere on the productivity of the forests, have been searched. Keywords such as CO<sub>2</sub>, fertilization, water use efficiency (WUE), productivity, growth, drought, forest, have been used. The indicators Publication Report, Impact Factor, Date, Number of Reports, Location, Methodology, Trees/ Plantation Species, Keyword, Result, Altitude and Coordinates have been recorded.

In order to identify the limiting factors that could influence the conclusions of the papers, the trends of temperature and precipitations at the positions of research, have been scrutinized. A research has been done concerning the geographical distribution of the species, which have been studied, and they have been classified according to their limits of their natural spread and their thermic margins.

From the data analysis, it has been revealed that the papers which do not show any impact of the rise of the CO<sub>2</sub> concentration in the atmosphere on the productivity of the forests, are more influential on the science community, which poses a serious concern about the importance of the conclusions of the papers that show positive impact.

The parameters of temperature, precipitations, altitude and geographical distribution of the species studied in the papers, have been searched and analysed. These data were compared with the results of the papers where contradictions occurred. Thus, it can be said that there are weaknesses in the results of the papers and therefore, indications of misinterpretation of their findings.

It has been discovered that in the most papers, which conclude to a positive impact of the rise of the CO<sub>2</sub> concentration on the productivity of the forests, the data of the papers' research position are not considered, for example the coordinates, the altitude and the relation of population which have been examined, with the geographical distribution of the species, although they are given in the papers. The influence of the parameters of climate change and the fluctuations of precipitation are not considered together. The specialized mechanism of tree growth of the species examined, is not considered for investigation, which would reveal the way the species would react at the specific research position and what the limiting factors would be.

Consequently, the papers that study the impact of the rise of the CO<sub>2</sub> concentration on the productivity of the forests should not exclusively connect any recorded increase with the rise of CO<sub>2</sub>. The mechanism of tree growth is complicated where a range of factors interact, which demands a specialized analysis for every species at the specific position that is studied. Finally, further studies are needed to be done which would examine the way that climate change affects the productivity of forests.

## **Ευχαριστίες**

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής Δρ. Δημήτρη Σαρρή. Η συμμετοχή του στην ολοκλήρωση της υπήρξε καταλυτική. Πάντοτε διαθέσιμος, με προθυμία να παρέχει την απαιτούμενη επιστημονική καθοδήγηση για την υλοποίηση της διατριβής. Επίσης θα ήθελα να τον ευχαριστήσω ιδιαίτερα για την ηθική υποστήριξη που μου παρείχε για την εκπόνηση της διατριβής, που χωρίς αυτή θα ήταν πραγματικά αδύνατη η αποπεράτωση της.

Ευχαριστίες θα ήθελα να δώσω στην εξεταστική επιτροπή Δρ. Γιάννη Βογιατζάκη, Δρ. Δημήτρη Σαρρή και Δρ. Παρασκευή Μανωλάκη για την πίστωση χρόνου που είχαν παραχωρήσει για την ολοκλήρωση της διατριβής μετά την υποστήριξη της.

Τελικώς θα ήθελα να ευχαριστήσω ξανά τους Δρ. Δημήτρη Σαρρή και Δρ. Γιάννη Βογιατζάκη για την υποστήριξη τους και την μεσολάβηση τους στο Πρυτανικό Συμβούλιο, προς την εξασφάλιση της κατ' εξαίρεση χρονικής παράτασης, η οποία ήταν καθοριστική για την εκπόνηση της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής.

## Περιεχόμενα

	<b>Ανοικτό Πανεπιστήμιο Κύπρου</b> .....	i
	<b>Ανοικτό Πανεπιστήμιο Κύπρου</b> .....	ii
1	Εισαγωγή.....	7
2	Βιβλιογραφική Ανασκόπηση.....	10
2.1	Δάση και Κλιματική αλλαγή.....	12
2.1.1	Κατακρημνίσεις και Θερμοκρασία.....	12
2.1.2	Δασικές πυρκαγιές.....	16
2.1.3	Ερημοποίηση.....	18
2.2	Επίδραση των δασικών οικοσυστημάτων στην κλιματική αλλαγή.....	20
2.3	Διαχείριση και Επιπτώσεις κλιματικής αλλαγής στα δασικά οικοσυστήματα.....	22
2.4	Δάση και διοξείδιο του άνθρακα.....	24
2.5	Μελέτη των Δακτυλίων των δέντρων.....	27
2.6	Περιοριστικοί παράγοντες και φυσιολογία ανάπτυξης φυτών.....	30
2.6.1	Διοξείδιο του άνθρακα.....	30
2.6.2	Φως.....	34
2.6.3	Θερμοκρασία.....	37
2.6.4	Νερό.....	38
2.7	Επίδραση θέσης βλάστησης στην παραγωγή των δασών (Υψόμετρο και γεωγραφική κατανομή είδους).....	39
3	Μεθοδολογία.....	44
4	Αποτελέσματα.....	49
5	Συζήτηση – Συμπεράσματα – Εισηγήσεις.....	124
5.1	Συζήτηση.....	124
5.2	Περιορισμοί μελέτης.....	138
5.3	Συμπεράσματα.....	139
5.4	Εισηγήσεις.....	140
6	Βιβλιογραφία.....	142

# Κεφάλαιο 1

## 1 Εισαγωγή

Η καταγεγραμμένη αύξηση του ατμοσφαιρικού CO<sub>2</sub> εξαιτίας της κλιματικής αλλαγής έχει οδηγήσει στην υπόθεση ότι θα λειτουργήσει με κάποιο τρόπο στην ανάπτυξη της βλάστησης και των δασών. Αξιώνεται ότι υπάρχει το ενδεχόμενο η αύξηση αυτή να λειτουργεί ευεργετικά διαμέσου λίπανσης προς τα δάση.

Το ζήτημα αυτό έχει απασχολήσει σημαντικά την επιστημονική κοινότητα. Το ενδεχόμενο της ευεργετικής λίπανσης των δασών από το αυξημένο ατμοσφαιρικό CO<sub>2</sub> αποτελεί ένα επιχείρημα από κάποιους για πιθανή θετική επίδραση της κλιματικής αλλαγής στα δασικά οικοσυστήματα αλλά και ως μέσο μετριασμού των συνεπειών των εκπομπών του CO<sub>2</sub> το οποίο θα δεσμεύεται σε μεγαλύτερες ποσότητες στα δάση διαμέσου του μηχανισμού της αύξησης των δέντρων.

Η αύξηση των συγκεντρώσεων των αερίων του θερμοκηπίου είναι ένας παράγοντας που έχει προκαλέσει την κλιματική αλλαγή. Η κλιματική αλλαγή επέφερε μια αλυσίδα από άλλες συνέπειες όπως άνοδο της θερμοκρασίας, διακυμάνσεις των κατακρημνίσεων, διαταραχές οικοσυστημάτων, αύξηση των πυρκαγιών, υποβάθμιση εδαφών, ερημοποίηση, εξαφάνιση ειδών, μείωση οικοτόπων, περιορισμό και μετατόπιση της γεωγραφικής κατανομής – ενδιαιτημάτων των ειδών.

Η αύξηση των δέντρων και κατ' επέκταση η παραγωγικότητα των δασών δεν επηρεάζεται μόνο από το ατμοσφαιρικό CO<sub>2</sub> αλλά και από άλλους παράγοντες που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη όταν αυτή μελετάται σε σχέση με κάποιον από αυτούς. Δύναται να εξαρτάται από την άνοδο της θερμοκρασίας, τη διακύμανση των κατακρημνίσεων, τη γεωγραφική εξάπλωση του είδους και τη θέση των πληθυσμών του σε αυτήν, την ηλιοφάνεια και ένταση του φωτός, την ηλικία και πυκνότητα της βλάστησης, τη γονιμότητα των εδαφών και τη διαθεσιμότητα των θρεπτικών στοιχείων. Επηρεάζεται επίσης από τη γεωμορφολογία του εδάφους, τον

προσανατολισμό και την έκθεση βόρεια ή νότια καθώς και από τις ιδιαίτερες συνθήκες του μικροκλίματος που επικρατούν σε κάθε περιοχή.

Τίθεται εύλογα ο προβληματισμός κατά πόσον στις έρευνες που έγιναν για διερεύνηση της επίδρασης της αύξησης της συγκέντρωσης του CO<sub>2</sub> στην ατμόσφαιρα στην παραγωγή των δασών έχουν συνυπολογιστεί και όλες αυτές οι παράμετροι. Σε ποιο βαθμό η επιστημονική κοινότητα έχει αναζητήσει και καταφέρει να απομονώσει την επίδραση του ατμοσφαιρικού CO<sub>2</sub> από τις παραμέτρους της θερμοκρασίας, των κατακρημνίσεων, της αποδοτικότητας χρήσης νερού και των υπολοίπων και να συνδέσει αποκλειστικά την παραγωγή των δασών με την αύξηση του ατμοσφαιρικού CO<sub>2</sub>.

Στόχος λοιπόν της διατριβής είναι να εντοπιστούν εργασίες από τη βιβλιογραφία που έχουν μελετήσει την πιθανή επίδραση της αύξησης της συγκέντρωσης του ατμοσφαιρικού CO<sub>2</sub> στην παραγωγικότητα των δασών. Από τις εργασίες να καταγραφούν οι ευρεθείσες τάσεις της επίδρασης που δύναται να είναι αύξηση ή μη επίδραση. Να διερευνηθεί ο τρόπος που έχουν προσεγγίσει το αντικείμενο και η μεθοδολογία με την οποία έχουν καταλήξει στα συμπεράσματα τους.

Ακολούθως να γίνει προσπάθεια εντοπισμού των παραγόντων και των παραμέτρων που καθορίζουν την επίδραση του ατμοσφαιρικού CO<sub>2</sub> στην παραγωγικότητα των δασών στις θέσεις μελέτης. Επιπλέον να διερευνηθεί ποιοι από αυτούς τους παράγοντες δύναται να είναι περιοριστικοί σε κάθε περίπτωση και κατά πόσον έχουν συνυπολογιστεί στην εξαγωγή των συμπερασμάτων των εργασιών. Να εξεταστεί ο αντίκτυπος των εργασιών αυτών στην επιστημονική κοινότητα σε σχέση με το αποτέλεσμα τους και των αριθμό αναφορών τους.

Οι παράμετροι της ανόδου της θερμοκρασίας και της διακύμανσης της βροχόπτωσης δύναται να επηρεάσουν ο καθένας με τον τρόπο του ή συνδυαστικά την παραγωγικότητα των δασών. Επιπλέον όταν μελετάται η παραγωγικότητα των δασών χρειάζεται να καταγράφονται και να συνυπολογίζονται παράμετροι όπως η γεωγραφική κατανομή του είδους, το υψόμετρο και οι συντεταγμένες της τοποθεσίας της έρευνας. Δείκτες που δεικνύουν τα θερμικά όρια του είδους προς μελέτη στο σημείο έρευνας, γεγονός που έχει υψηλή σημασία για την αντίδραση του πληθυσμού στις μεταβαλλόμενες κλιματικές συνθήκες.

Ως εκ τούτου χρειάζεται να γίνει προσπάθεια εντοπισμού και αντιπαραβολής των αποτελεσμάτων και δεδομένων που δίνονται από τις εργασίες υπό μελέτη, με τις παραμέτρους της θερμοκρασίας και των κατακρημνίσεων στο επίπεδο της θέσης μελέτης των ερευνών, με στόχο ακριβώς να εξευρεθεί ποιοι παράγοντες έχουν ληφθεί υπόψη στην εξαγωγή των αποτελεσμάτων τους και κατά συνέπεια να προσδιοριστεί κατά πόσον υπάρχουν αδυναμίες και τυχών παρερμηνείες στη σύνδεση της ευρεθείσας αύξησης της παραγωγικότητας των δασών αποκλειστικά με το αυξημένο CO<sub>2</sub> της ατμόσφαιρας.

# Κεφάλαιο 2

## 2 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

Ανάμεσα στα πιο σημαντικά οικοσυστήματα περιλαμβάνονται αναμφίβολα τα δάση. Προσφέρουν μια σειρά περιβαλλοντικών υπηρεσιών και είναι πολύ πλούσια σε βιοποικιλότητα. Οι γρήγορες και απότομες αλλαγές στις χρήσεις της γης εξαιτίας των λανθασμένων πολιτικών διαχείρισης, μεταξύ άλλων υπερ-εκμετάλλευσης, ανάπτυξης, πιέσεων της διεθνούς αγοράς, η απώλεια φυσικών ενδιαιτημάτων και η ρύπανση, είναι μερικοί μόνο από τους πιο καθοριστικούς παράγοντες που επενεργούν στα δάση και προκαλούν την υποβάθμισή τους. Αν σε αυτούς τους παράγοντες, προστεθεί και η κλιματική αλλαγή συνοδευόμενη από ακραία καιρικά φαινόμενα όπως καταρρακτώδεις βροχές, κύματα καύσωνα, δυνατές ανεμοθύελλες και περιόδους ξηρασίας, η ικανότητα προσαρμογής και ανθεκτικότητας των δασών μειώνεται δραστικά.

Ανάμεσα στις πιο άμεσες συνέπειες της κλιματικής αλλαγής βρίσκονται η μεγάλη κλίμακας πυρκαγιές των δασών που καταστρέφουν ή και επηρεάζουν τα δάση. Οι συνέπειες της κλιματικής αλλαγής σε συνδυασμό με την κακοδιαχείριση των δασών, έχουν ως συνέπεια την αύξηση της έντασης της συχνότητας και του μεγέθους των πυρκαγιών. Αυτό το φαινόμενο παρατηρήθηκε ιδιαίτερα σε χώρες της Μεσογείου όπως Ελλάδα, Νότια Γαλλία, Ισπανία, Ιταλία και Πορτογαλία κατά τη διάρκεια των τελευταίων ετών. Οι συνέπειες στα δασικά οικοσυστήματα παγκοσμίως θα είναι καταστροφικές αν οι ίδιες συνθήκες επικρατήσουν σε όλο τον πλανήτη.

Αποτελεί πρώτιστη προτεραιότητα για τις κυβερνήσεις των χωρών και τους διεθνείς οργανισμούς που εργάζονται στην περιοχή η αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής.

Φορείς για την προστασία της φύσης όπως η IUCN (International Union for Conservation of Nature) και το WWF (worldwildlife) επιλαμβάνονται δραστηριοτήτων σε σχέση με την κλιματική αλλαγή και τα δάση που, μεταξύ άλλων, περιλαμβάνει την εφαρμογή πολιτικών προσαρμογής για τη διαχείριση των συνεπειών που προκαλούνται από την κλιματική αλλαγή και την ανάπτυξη δυνατοτήτων οικολογικής προσαρμογής.

Ανάμεσα σε άλλα η Διακήρυξη των Αθηνών, 2008 που έγινε υπό την αιγίδα του γραφείου του WWF για τη Μεσόγειο, του WWF Ελλάς και του Κέντρου για τη Συνεργασία στη Μεσόγειο της IUCN (IUCN-Med), παρακινεί ταυτόχρονα όλες τις Μεσογειακές χώρες να εργαστούν από κοινού, και να αναπτύξουν στρατηγικές για τη ελάττωση των κινδύνων και την προσαρμογή στην κλιματική αλλαγή. Αναλύθηκε η σημασία, η αναγκαιότητα και οι ευκαιρίες για την αύξηση της ικανότητας προσαρμογής των δασών αλλά και των κοινωνιών εν όψη των παγκόσμιων αλλαγών. Εξετάστηκαν οι εκτιμήσεις για την κλιματική αλλαγή στην Μεσόγειο και παρουσιάστηκαν πολιτικές και εργαλεία προσαρμογής που έχουν δοκιμαστεί με επιτυχία σε άλλες περιοχές.

Τα οικοσυστήματα είναι δυναμικά και προσαρμόζονται συνεχώς στις όποιες περιβαλλοντικές μεταβολές. Κατά το παρελθόν τα δασικά οικοσυστήματα έχουν περάσει πολυάριθμες μεταβολές στο κλίμα, ανταποκρινόμενα με ποικίλους τρόπους σε αυτές. Σημαντική απόδειξη της ικανότητάς τους να προσαρμόζονται σε απότομες περιβαλλοντικές αλλαγές και να διατηρούνται κατά τη διάρκεια των χιλιετιών αποτελεί ο σημαντικός αριθμός υπολειμματικών ειδών της Τριτογενούς περιόδου και παλαιοενδημικών ειδών στα δάση. Παρ' όλα αυτά, υπάρχουν στοιχεία και για την καταστροφή δασικών ειδών και οικοσυστημάτων, εξαιτίας προηγούμενων παγκόσμιων αλλαγών. Οι εξαφανίσεις ολόκληρων δασικών κοινοτήτων και ειδών προερχόμενες από πυρκαγιές αποτελούν χαρακτηριστικά παραδείγματα σε τοπικό και περιφερειακό επίπεδο ως συνδυασμός των κλιματικών αλλαγών του Ολόκαινου και των Νεολιθικών πυρκαγιών που έγιναν με επιδίωξη τη μετατροπή των δασότοπων σε καλλιεργήσιμη γη και βοσκότοπους (Tinner *et al.*, 2005); (Carrión, 2003).

Οι έντονες αλλαγές στις κλιματικές συνθήκες που προβλέπονται μέσα στα επόμενα 100 χρόνια επίκειται να προκαλέσουν σημαντικές επιβαρύνσεις στα δασικά οικοσυστήματα. Τα δάση θα είναι ιδιαιτέρως ευαίσθητα στις ερχόμενες περιβαλλοντικές αλλαγές και τις επιπτώσεις τους καθώς η ανθρώπινη παρέμβαση στην περιοχή είναι τεράστια.

Σύμφωνα με παλαιο-οικολογικά δεδομένα, εάν η συχνότητα των πυρκαγιών αυξηθεί σημαντικά σαν συνέπεια των επικείμενων κλιματικών αλλαγών, τα ευαίσθητα δασικά οικοσυστήματα όπως αυτά στην περιοχή της Μεσογείου και τα διάφορα ορεινά δάση ενδημικών κωνοφόρων θα τεθούν σε σοβαρό κίνδυνο. Συνεπώς οι πρακτικές που εφαρμόζονται για την προστασία αλλά και τη διαχείριση των δασών θα πρέπει να βοηθήσουν στην εφαρμογή στρατηγικών προσαρμογής με επιδίωξη την παρεμπόδιση της τρέχουσας περιβαλλοντικής καταστροφής και ταυτόχρονα, να ελαττώνουν τον κίνδυνο δυσάρεστων απωλειών στο μέλλον.

## **2.1 Δάση και Κλιματική αλλαγή**

### **2.1.1 Κατακρημνίσεις και Θερμοκρασία**

Οι κλιματικές συνθήκες στον πλανήτη επίκειται να αλλάξουν, με συνέπεια άμεσες ή έμμεσες συνέπειες στις δασικές περιοχές επιπρόσθετα με τις άλλες μεταβολές που αναμένεται να επιφέρει η αλλαγή του κλίματος.

Η αλλαγή του κλίματος είναι μια από τις κυριότερες και πιο σημαντικές προκλήσεις που θα αντιμετωπίσουν τα δάση στις επερχόμενες δεκαετίες καθώς αναμένεται να επηρεάσουν δραματικά τις συνθήκες αύξησης των δασών και όχι μόνο. Ανάμεσα στις τάσεις οι οποίες έχουν καταγραφεί είναι η μείωση των κατακρημνίσεων στις Μεσογειακές περιοχές για την περίοδο 1961-1990 (De Luís et al., 2001);(Penuelas and Boada, 2003);(Piñol, Terradas and Lloret, 1998). Οι κατακρημνίσεις δεν έχουν μόνο μειωθεί αλλά και η ετήσια κατανομή τους έχει αλλάξει με αυξανόμενη ένταση (De Luís et al., 2001). Η θερμοκρασία αναμένεται να αυξηθεί μεταξύ 2 και 4 βαθμών κατά τον επόμενο αιώνα σε περιοχές με μεσογειακό κλίμα (Rambal and Hoff, 1998).

Οι κατακρημνίσεις συγκεκριμένα στη λεκάνη της Μεσογείου αναμένεται να ελαττωθούν το καλοκαίρι και το φθινόπωρο αλλά να αυξηθούν το χειμώνα με αποτέλεσμα να υπάρξουν μεγαλύτερης έντασης κατακρημνίσεις, ελάττωση της υγρασίας του εδάφους (Déqué, Marquet and Jones, 1998) αλλά και καθολική μείωση στη διαθεσιμότητα του νερού εξαιτίας της αύξησης της εξάτμισης του νερού. Οι κλιματικές αλλαγές προκαλούν την αύξηση συγκέντρωσης των αερίων του θερμοκηπίου με συνέπεια τις αλλαγές στη συχνότητα, την ένταση και τη διάρκεια των ακραίων καιρικών φαινομένων με πολύ

ζεστές μέρες, ζεστές αέριες μάζες, έντονες βροχοπτώσεις και λιγότερες κρύες μέρες (Dios, Fischer and Colinas, 2007). Παρ' όλα αυτά το μέγεθος όλων αυτών των φαινομένων είναι δύσκολο να προβλεφθεί.

Η διαφοροποίηση στην κατανομή των ετήσιων κατακρημνίσεων πιθανόν να έχει μεγαλύτερες επιδράσεις στην αύξηση ιδιαίτερα των Μεσογειακών δασών σε σύγκριση με την ελαττωμένη ποσότητα τους, εξαιτίας του γεγονότος ότι τα δέντρα έχουν προσαρμοστεί ούτως ώστε να αναπτύσσονται μέσα σε συγκεκριμένα κλιματικά όρια και συγκεκριμένη υδατική παροχή (Dios, Fischer and Colinas, 2007). Παρ' όλο ότι τα δάση παρουσιάζουν μια σχετική προσαρμοστικότητα με τις ασταθείς και μεταβαλλόμενες καιρικές συνθήκες η αύξηση και η ζωτικότητα τους αναμένεται να επηρεαστεί μέσα από το πέρασμα του χρόνου και την παρατεταμένη μείωση της παροχής νερού.

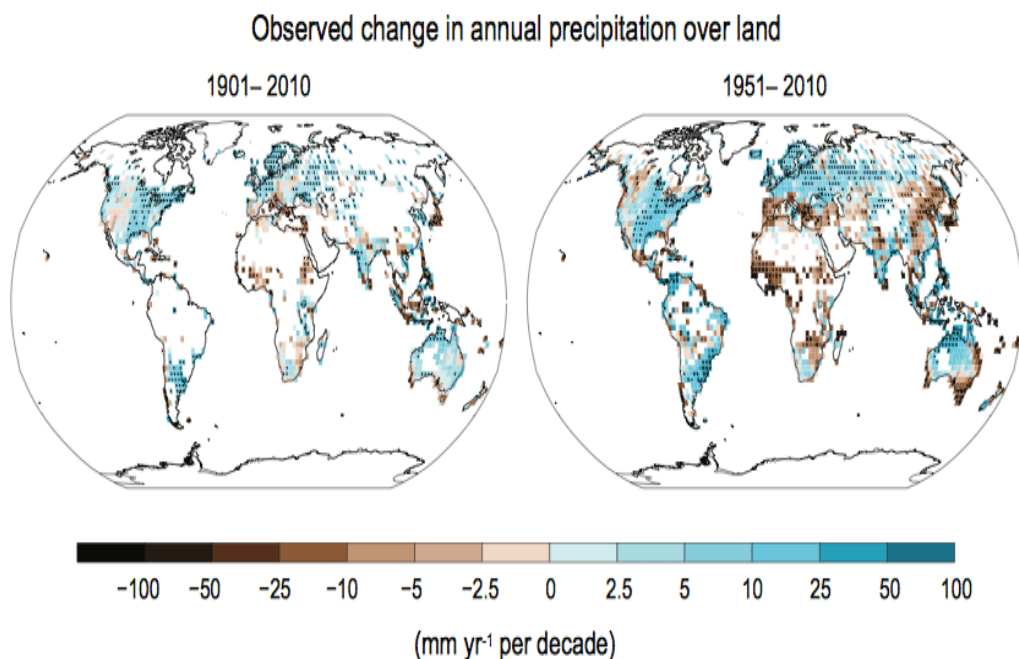
Οι αλλαγές στην ποσότητα των κατακρημνίσεων που λαμβάνουν ορισμένες περιοχές, το είδος των κατακρημνίσεων που πέφτουν (βροχή, χιόνι), η κατανομή τους, καθώς και η εμφάνιση πιο ακραίων συμβάντων, είναι πιθανό να συμβούν καθώς ο πλανήτης θερμαίνεται. Οι μεταβολές στα πρότυπα των κατακρημνίσεων μπορεί να σημαίνουν αύξηση των πλημμυρών σε ορισμένες περιοχές, ενώ άλλες να αντιμετωπίσουν μεγαλύτερη συχνότητα ξηρασίας (Climate Change Connection, 2016).

Οι ενδεχόμενες μεταβολές στο μέγεθος και την κατανομή των κατακρημνίσεων παρουσιάζουν μεγάλο ενδιαφέρον για όλες τις περιοχές του κόσμου. Οι κατακρημνίσεις είναι ζωτικής σημασίας για τη διατήρηση των υδάτινων πόρων. Η αβεβαιότητα σχετικά με τον τρόπο με τον οποίο τα πρότυπα των κατακρημνίσεων θα μπορούσαν να αλλάξουν στο μέλλον καθιστά δυσχερείς τις προσπάθειες προσαρμογής (Climate Change Connection, 2016).

Η ακρίβεια της αλλαγής των κατακρημνίσεων στις παγκόσμιες χερσαίες εκτάσεις από το 1901 είναι χαμηλή πριν από το 1951 και έπειτα μέση (Εικόνα 2.1.). Κατά μέσο όρο στα μεσαία γεωγραφικά πλάτη του Βορείου Ημισφαιρίου, οι κατακρημνίσεις αυξήθηκαν από το 1901, με μέση ακρίβεια πριν το 1951 και υψηλή μετά. Για άλλα γεωγραφικά πλάτη, ο μέσος όρος ανά περιοχή και οι μακροπρόθεσμες θετικές ή

αρνητικές τάσεις έχουν χαμηλή ακρίβεια. Έχουν παρατηρηθεί αλλαγές με πολλές ακραίες καιρικές και κλιματικές συνθήκες περίπου από το 1950 (IPCC, 2013).

Υπάρχουν πιθανώς περισσότερες περιοχές γης όπου ο αριθμός των βαριών κατακρημνίσεων να έχει αυξηθεί σε σχέση με αυτές όπου έχει μειωθεί. Η συχνότητα ή η ένταση των βαριών κατακρημνίσεων πιθανότατα να αυξήθηκε στη Βόρεια Αμερική και την Ευρώπη. Σε άλλες ηπείρους, η ακρίβεια στις μεταβολές των βαριών βροχοπτώσεων είναι μέτρια (IPCC, 2013).

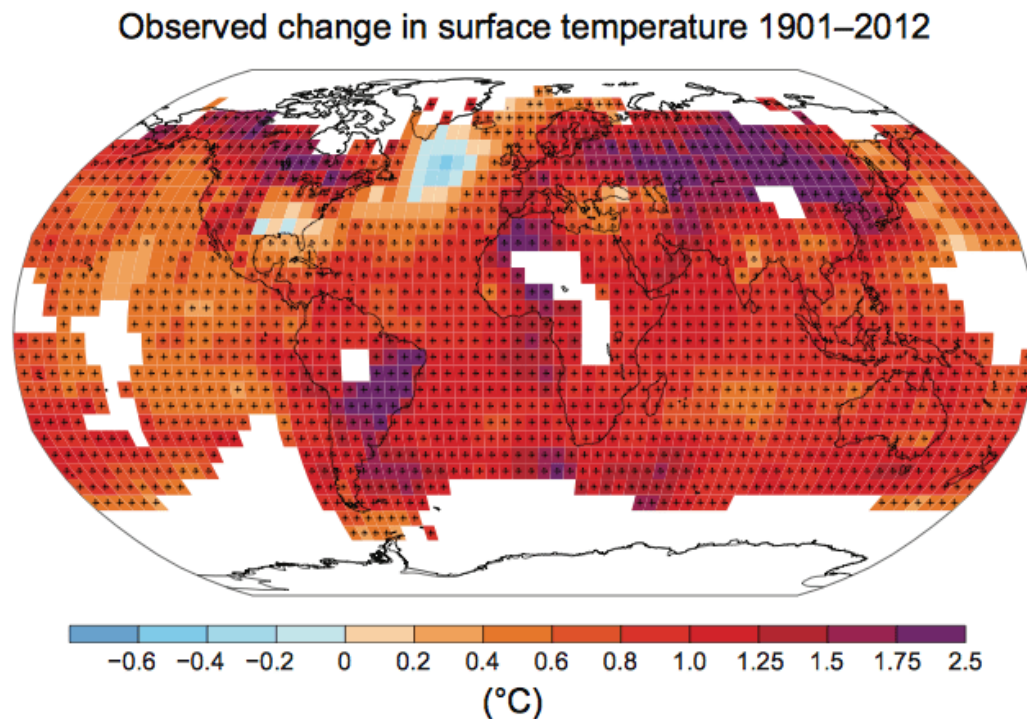


**Εικόνα 2.1.** Οι χάρτες των μεταβολών των παρατηρούμενων βροχοπτώσεων από το 1901 έως το 2010 και από το 1951 έως το 2010 (IPCC, 2013).

Κάθε μία από τις τελευταίες τρεις δεκαετίες ήταν διαδοχικά θερμότερη στην επιφάνεια της Γης από οποιαδήποτε άλλη προηγούμενη δεκαετία από το 1850. Στο Βόρειο Ημισφαίριο, 1983-2012 ήταν ίσως η πιο θερμή περίοδος των 30 χρόνων των τελευταίων 1400 ετών (μέτρια ακρίβεια). Τα συνολικά κατά μέσον όρο συνδυασμένα δεδομένα για τη θερμοκρασία εδάφους και τα ωκεάνια επιφάνεια, όπως υπολογίζονται με γραμμική τάση, δείχνουν αύξηση της θερμοκρασίας 0,85 [0,65 έως 1,06] °C, κατά την περίοδο 1880 έως 2012. Η συνολική αύξηση μεταξύ του μέσου όρου της περιόδου 1850-1900 και της περιόδου 2003-2012 είναι 0,78 [0,72-0,85] °C, (IPCC, 2013).

Για τη μεγαλύτερη περίοδο κατά την οποία ο υπολογισμός των περιφερειακών τάσεων είναι επαρκώς πλήρης (1901 έως 2012), σχεδόν σε ολόκληρο τον πλανήτη έχει συμβεί

υπερθέρμανση της επιφάνειας (εικόνα 2.2). Εκτός από την ισχυρή αύξηση της θερμοκρασίας με πολλές κατανομές δεκαετιών, η μέση παγκόσμια θερμοκρασία της επιφάνειας παρουσιάζει σημαντική μεταβλητότητα τόσο σε επίπεδο δεκαετίας όσο και ετησίως (IPCC, 2013).



**Εικόνα 2.2.** Παγκόσμιες μέσες συνδυασμένες ανωμαλίες θερμοκρασίας εδάφους και ωκεάνιας επιφάνειας, από το 1850 έως το 2012 (IPCC, 2013).

Οι ανακατασκευές θερμοκρασίας επιφανείας σε ηπειρωτική κλίμακα δείχνουν, με μεγάλη βεβαιότητα, περιόδους πολλών δεκαετιών κατά τη διάρκεια της μεσαιωνικής κλιματικής ανωμαλίας (έτος 950 έως 1250), ότι σε ορισμένες περιοχές ήταν τόσο υψηλή θερμοκρασία όσο και στα τέλη του 20ού αιώνα. Όμως αυτές οι θερμές περίοδοι σε περιφερειακό επίπεδο δεν εμφανίστηκαν με συνέπεια σε όλες τις περιοχές όπως η αύξηση της θερμοκρασίας στα τέλη του 20ου αιώνα (IPCC, 2013).

Είναι πολύ πιθανό ότι ο αριθμός των κρύων ημερών και νυχτών να έχει μειωθεί και ο αριθμός των ζεστών ημερών και νυχτών να έχει αυξηθεί σε παγκόσμια κλίμακα. Είναι πιθανό η συχνότητα των κυμάτων υψηλής θερμοκρασίας να έχει αυξηθεί σε μεγάλα μέρη της Ευρώπης, την Ασία και την Αυστραλία (IPCC, 2013).

Τα στοιχεία από τους δακτυλίους των δένδρων, τους δορυφόρους και τα σταθερά ισότοπα υποδηλώνουν ότι οι θερμότερες και ξηρότερες συνθήκες επηρεάζουν τη

θερμοκρασία και την υδατική καταπόνηση που συνδέεται με τη ξηρασία, προκαλώντας έτσι μείωση της αύξησης των δέντρων σε ορισμένες περιοχές (Berner et al., 2011). Επομένως η αύξηση της θερμοκρασίας του πλανήτη αναμένεται να επηρεάσει δραστικά την παραγωγικότητα των δασών στις περιοχές αυτές.

Έρευνες που αφορούν τις παγκόσμιες αλλαγές και επιπτώσεις της θέρμανσης στα δασικά οικοσυστήματα έχουν επικεντρωθεί σε επίπεδο φυσιολογίας (Castells et al., 2002), (Catovsky, Holbrook and Bazzaz, 2002) καθώς επίσης και στο επίπεδο που αφορούν αλλαγές στην επιφάνεια της γης (Penuelas and Boada, 2003). Υπάρχει επίσης αυξημένο ενδιαφέρον στη μελέτη της αυξανόμενης συγκέντρωσης του άνθρακα μέσω της διαχείρισης των δασών (Canadell and Pataki, 2002); (Guo and Gifford, 2002).

Υπάρχουν πολύ λίγες έρευνες και μελέτες οι οποίες συγκεντρώνονται στις επιδράσεις στις οποίες αναμένονται να προκληθούν εξαιτίας της αύξησης της θερμοκρασίας του πλανήτη στα δάση που με τη σειρά τους αναμένονται να καθορίσουν σε μεγάλο βαθμό τη μελλοντική δασική σύνθεση και δομή σε αυτό το μεταβαλλόμενο περιβάλλον (Lindner, 2000). Υπάρχει γενικά έλλειψη πληροφοριών και ερευνών στις κλιματικές αλλαγές και για συγκεκριμένα βιοσυστήματα (Dios, Fischer and Colinas, 2007).

### **2.1.2 Δασικές πυρκαγιές**

Η πιο άμεση και ραγδαία επίπτωση της κλιματικής αλλαγής ιδιαίτερα σε περιοχές με μεσογειακό κλίμα αφορά στις δασικές πυρκαγιές. Η αύξηση των πυρκαγιών αλλά και της έντασης τους καθώς και της έκτασης των καίόμενων περιοχών, διευκολύνεται από τις έντονα ακραίες καιρικές συνθήκες, τις συνθήκες ξηρασίας, τις μακριές περιόδους υψηλών θερμοκρασιών σε συνδυασμό με τις αλλαγές χρήσεων γης. Οι κλιματικές συνθήκες επιτέλεσαν σημαντικό ρόλο στην ένταση και εξάπλωση των πυρκαγιών, ανεξάρτητα από τα αίτια έναρξης τους και τα προβλήματα αντιμετώπισής τους, με σημαντικές επιπτώσεις στα δασικά οικοσυστήματα. Ευπαθή δασικά οικοσυστήματα όπως τα διάφορα ορεινά δάση κωνοφόρων, τίθενται σε σοβαρό κίνδυνο εξαιτίας της μεγάλης κλίμακας πυρκαγιών σε συνδυασμό με την αυξανόμενη συχνότητα παρουσίας πυρκαγιών.

Σύμφωνα με τους Dios, Fischer and Colinas (2007), η έκταση στην Ισπανία η οποία έχει καταστραφεί από τη φωτιά τη διάβρωση και την απερίμωση συνολικά αυξήθηκε κατά 600% μεταξύ των ετών 1960 και 1990, παρόλο ότι η συχνότητα των πυρκαγιών είχε μειωθεί για την ίδια περίοδο (De Luís, et al., 2001). Αν και η τάση αυτή δεν οφείλεται στις κλιματικές επιδράσεις (π.χ.: το ποσό των καυσίμων έχει αυξηθεί εις βάρος της οριακής Γεωργίας), η υπερθέρμανση του κλίματος θεωρείται ότι έχει συμβάλει σημαντικά, κυρίως εξαιτίας της αύξησης της θερμοκρασίας της ημέρας και της σχετικής μείωσης της υγρασίας που έχουν επηρεάσει αρνητικά την ανάπτυξη της βλάστησης. Έχει αυξηθεί ο αριθμός των ημερών ανά έτος κατά τις οποίες η χαμηλή σχετική υγρασία και οι υψηλές θερμοκρασίες δημιουργούν συνθήκες ευνοϊκές για μεγάλες καταστροφικές πυρκαγιές (De Luís *et al.*, 2001), (Piñol, Terradas and Lloret, 1998).

Η συνέργεια που δημιουργήθηκε από την αυξανόμενη συχνότητα των πυρκαγιών αλλά και την υψηλή ένταση των καταιγίδων αύξησαν με τη σειρά τους τη διάβρωση του εδάφους (Giovannini *et al.*, 2001), σε συνάρτηση με την αλλοίωση και την καταστροφή του εδάφους μετά από φωτιά σε δάση από πεύκα και άλλη βλάστηση, η οποία προήλθε μετά από την εγκατάλειψη των καλλιεργειών. Ωστόσο από μελέτη των De Luís, *et al.* (2001), διαφάνηκε ότι υψηλής έντασης βροχοπτώσεις μετά την πυρκαγιά μπορεί να επηρεάσουν δυσμενώς την αναδάσωση εξαιτίας απωλειών εδάφους και αζώτου. Οι συγκεκριμένες εκτάσεις θα μπορούσαν να μετατραπούν από δασώδεις περιοχές σε θαμνώδεις ή ακόμα και χαμηλότερης βλάστησης, ειδικότερα οι περιοχές οι οποίες ευρίσκονται κοντά στην έρημο ή και στις στέπες. Οι άγονες ζώνες θα υποστούν το μεγαλύτερο αντίκτυπο. Ήδη έχει παρατηρηθεί ότι αρκετά είδη έχουν μεταναστεύσει από άγονες περιοχές προς τις λιγότερο ξηρές περιοχές. Η κατάσταση επιδεινώνεται από κοινωνικό-οικονομικούς παράγοντες όπως την ερήμωση και την εγκατάλειψη της υπαίθρου (Puigdefábregas and Mendizabal, 1998).

### 2.1.3 Ερημοποίηση

Η διαδικασία υποβάθμισης ημίξηρων, ξηρών και ύφυγρων εκτάσεων, που δημιουργείται ή προκαλείται από βιοφυσικούς και ανθρώπινους παράγοντες ονομάζεται ερημοποίηση. Μείωση ή και απώλεια της οικονομικής και βιολογικής αποδοτικότητας μη αρδευόμενης και αρδευόμενης γεωργικής γης, δασικών εκτάσεων και δασών σημαίνει υποβάθμιση της γης.

Ο αυξανόμενος ρυθμός της συχνότητας, της έντασης και της έκτασης των πυρκαγιών, η αλλαγή του κλίματος σε συνδυασμό με κακές πρακτικές διαχείρισης, μη βιώσιμες αλλαγές στις χρήσεις γης, ανεπαρκή αποκατάσταση ορεινών οικοσυστημάτων και κακές πρακτικές αποκατάστασης, οδηγούν στην υποβάθμιση των δασών, με συνέπεια να κάνουν την εμφάνισή τους φαινόμενα διάβρωσης.

Συγκεκριμένα η Σύμβαση των Ηνωμένων Εθνών για την καταπολέμηση της ερημοποίησης το 1994 την ορίζει ως « υποβάθμιση της γης σε ξηρές, ημι-άνυδρες και ξηρές ύφυγρες περιοχές που προκύπτουν από διάφορους παράγοντες, συμπεριλαμβανομένων των κλιματικών μεταβολών και των ανθρώπινων δραστηριοτήτων » (Tchakerian, 2015). Σε περιοχές ιδιαίτερα με μεγάλη κλίση και έντονο ανάγλυφο, η απώλεια εδάφους και η ανάκαμψη του οικοσυστήματος καθίσταται αδύνατη, επαυξάνοντας τον κίνδυνο ερημοποίησης τους.

Ωστόσο ο ορισμός αυτός θεωρήθηκε ατελής καθώς η ερημοποίηση εντοπίστηκε και σε υγρό κλίμα όπως στη Σκωτία και την Ισλανδία καθώς και στην περιοχή των τροπικών δασών στη Νότια Αφρική. Χρησιμοποιείται επίσης η εξειδίκευση βραχώδης ερημοποίηση, για να χαρακτηρίσει τις διαδικασίες που μετασχηματίζουν μια καρστική περιοχή που καλύπτεται από τη βλάστηση και το έδαφος σε ένα βραχώδες τοπίο σχεδόν απαλλαγμένο από έδαφος και βλάστηση. Κάποιες καρστικές περιοχές της ευρωπαϊκής μεσογειακής περιοχής εμπίπτουν σε αυτήν την κατηγορία ξηρού εδάφους λόγω του δείκτη ξηρότητας κάτω από 0,65. Ο χαμηλός ρυθμός σχηματισμού του εδάφους στις περιοχές αυτές και η υψηλή διαπερατότητα των ανθρακικών πετρωμάτων δημιουργούν ένα εύθραυστο και ευάλωτο περιβάλλον που είναι ευαίσθητο στην αποδάσωση και στη διάβρωση του εδάφους (Jiang, Lian and Qin, 2014).

Έχει συμβεί σε μεγάλο βαθμό στην Ευρωπαϊκή Μεσογειακή λεκάνη, το Dinaric Karst και στη Νοτιοδυτική Κίνα εξαιτίας εκτεταμένων ανθρώπινων δραστηριοτήτων σε οικολογικά εύθραυστα ανθρακικά πετρώματα. Έχει συμβεί και σε άλλες χώρες ή περιοχές του κόσμου, όπως στο Μπελίζ, τη Γουατεμάλα, το Μεξικό της Βόρειας Αμερικής, το Ισραήλ και την Ανατολική και Νοτιοανατολική Ασία, συμπεριλαμβανομένων σε νησιά της Ιαπωνίας και της Ινδονησίας. Η υποβάθμιση του εδάφους ή ακόμη και ερημοποίηση παρατηρείται σε ορισμένες από τις χώρες της Καραϊβικής όπως το Μπαρμπάντος και η Αϊτή, όπου οι απαιτήσεις για τους χερσαίους πόρους είναι υψηλές (Jiang, Lian and Qin, 2014).

Η χρονολόγηση της ερημοποίησης στην περιοχή της Μεσογείου, συμπεριλαμβανομένης της νότιας Γαλλίας, της Ισπανίας, της Ιταλίας και της Ελλάδας, είναι παρόμοια με την περιοχή του δυναρικού καρστικού, δηλαδή 1500 – 1000 π.Χ. Η ερημοποίηση ενδεχομένως να έχει συμβεί μετά τη Νεολιθική εποχή κατά την περίοδο 2000-1000 π.Χ. εξαιτίας της έντονης ανθρώπινης δραστηριότητας, όπως η αύξηση του πληθυσμού, η επέκταση της γεωργίας με τη χρήση της καύσης και η αποδάσωση στις παράκτιες περιοχές όπου βρίσκονται οι ασβεστολιθικοί σχηματισμοί. Επιπλέον η κτηνοτροφία και η εποχιακή μετακίνηση ανθρώπων με τα ζώα τους μεταξύ καλοκαιρινών και χειμερινών βοσκοτόπων, η συλλογή καυσόξυλων, οι κατασκευές και οι διάφοροι κλάδοι της βιομηχανίας όπως ναυπήγηση και μεταλλουργία καθώς και οι πόλεμοι. Από μελέτες έχει διαφανεί ότι οι ανθρώπινες διαταραχές είχαν χωρική και χρονική μεταβλητότητα σε όλη την περιοχή (Mendizábal and Puigdefábregas, 2003; Helldén, 1991; Jiang, Lian and Qin, 2014).

Η ερημοποίηση ενδεχομένως επηρεάζει το 40% της επιφάνειας της Γης και το 32% του ανθρώπινου πληθυσμού και όπως η παγκόσμια αλλαγή του κλίματος αποτελεί αντικείμενο της διεθνούς σύμβασης-πλασίου (Grainger, et al., 2000). Οι επιφάνειες που επηρεάζονται από την ερημοποίηση χαρακτηρίζονται από περιορισμένη κατακρήμνιση και έντονη εξατμισοδιαπνοή που οδηγούν σε αραιή ανάπτυξη της βλάστησης και στην εμφάνιση ομάδων απλών φυτικών δομών (Vorovencii, 2015).

Σε περιοχές που χαρακτηρίζονται από ερημοποίηση κύριος περιοριστικός παράγοντας για την παραγωγικότητα της βλάστησης είναι οι κατακρημνίσεις. Σε μελέτη που έγιναν

σε πληθυσμούς του είδους *Morus alba* σε περιοχές με βραχώδη ερημοποίηση εντοπίστηκε ότι η περιεκτικότητα σε αυξίνη, κυτοκίνη και γιβερελλίνες στις ρίζες κάτω από συνθήκες ξηρασίας εδάφους ήταν χαμηλότερες από τις συνθήκες υγρότερου εδάφους. Αντίθετα, η περιεκτικότητα σε αμπισικό οξύ και η δραστηριότητα του ριζικού συστήματος ήταν υψηλότερες υπό συνθήκες ξηρασίας εδάφους παρά σε συνθήκες υγρότερου εδάφους.

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το νερό είναι ο βασικός παράγοντας που περιορίζει την αύξηση αλλά ότι τα δέντρα προσαρμόζουν τις ενδογενείς ορμόνες στις ρίζες τους για να προωθήσουν την τροπική αύξηση και να αποκτήσουν επαρκή υγρασία και θρεπτικά συστατικά μακροπρόθεσμα. Συνεπώς κάτω από μακροχρόνιες συνθήκες έλλειψης ξηρασίας, οι μουριές διατηρούσαν υψηλή ριζική δραστηριότητα, η οποία φαίνεται να είναι προσαρμοστική, καθώς όλα τα δέντρα επιβίωσαν (Feng, Huang, Liu and Willison, 2016).

Η ερημοποίηση, η υποβάθμιση των εδαφών και η διάβρωση τους, η οποία εντείνεται από τις έντονες κατακρημνίσεις που προκαλούν ουσιαστική απομάκρυνση του ορυκτού εδάφους, οδηγώντας σε μειωμένη ποιότητα του, απώλεια θρεπτικών ουσιών και στη μειωμένη προς τα κάτω διείσδυση ύδατος (Hook and Sandercock, 2012), είναι παράγοντες που ασκούν περαιτέρω πίεση στην παραγωγικότητα των δασών και αναμένεται να επηρεάσουν με συγκεκριμένο τρόπο ιδιαίτερα κάθε είδος βλάστησης που τα ξηροθερμικά όρια κατανομής του βρίσκονται σε περιοχές που έχουν επηρεαστεί.

## **2.2 Επίδραση των δασικών οικοσυστημάτων στην κλιματική αλλαγή**

Η επίδραση των δασών στην κλιματική αλλαγή θεωρείται αναμφισβήτητη, καθώς αυτά εκτός από τα προϊόντα και τις ανεκτίμητες υπηρεσίες που προσφέρουν στον άνθρωπο, αμβλύνουν ταυτόχρονα τις αρνητικές επιπτώσεις της, πιο συγκεκριμένα τα δάση με τη διαδικασία της φωτοσύνθεσης δρουν ως «παγίδες» για το διοξείδιο του άνθρακα (CO<sub>2</sub>), το κυριότερο αέριο θερμοκηπίου και το μετατρέπουν σε βιομάζα, όταν όμως αυτά υλοτομούνται, καίγονται ή καταστρέφονται από επιβλαβείς οργανισμούς, αποτελούν πηγή CO<sub>2</sub>. Παράλληλα με τη διαδικασία της φωτοσύνθεσης απελευθερώνουν οξυγόνο

(O<sub>2</sub>), το οποίο είναι πολύτιμο για την επιβίωση του περιβάλλοντος αλλά και κάθε ζωντανού οργανισμού.

Ως απόρροια από την αλλαγή του κλίματος επίκειται μεταβολή, αύξηση ή μείωση της ετήσιας αύξησης των δέντρων (Lindner, 2000) και συγκεκριμένα αναμένεται αύξηση της πρωτογενούς παραγωγής στις βόρειες περιοχές της γης (Norby et al., 2005), (Korner, 2005). Ο διπλασιασμός της συγκέντρωσης του CO<sub>2</sub> στην ατμόσφαιρα μπορεί να αυξήσει την πρωτογενή παραγωγή, κατά 23% μέσο όρο, σε νεαρά δέντρα σύμφωνα με τους (Norby et al., 2005) και (Korner, 2005).

Παρ' όλα αυτά στις μεσογειακές περιοχές, όπου η φωτοσύνθεση μειώνεται εξαιτίας των πολύ υψηλών θερμοκρασιών, επίκειται μείωση του ρυθμού αύξησης της παραγωγικότητας και της βιομάζας (Lindner et al., 2010) & (Milad et al., 2011). Επιπλέον στις συγκεκριμένες περιοχές, η αύξηση της συχνότητας και της έντασης των διαταραχών, όπως προσβολές από παθογόνους οργανισμούς, πυρκαγιές καθώς και της μείωσης του ρυθμού αύξησης και παραγωγικότητας των δασών εξαιτίας της ξηρασίας, φαίνεται ότι θα επιδράσουν δυσμενώς στο ισοζύγιο δέσμευσης του CO<sub>2</sub> (Lindner et al., 2010).

Τα δάση και οι υπόλοιπες δασικές εκτάσεις της Ευρωπαϊκής Ένωσης (ΕΕ), καλύπτουν πάνω από το 42% της χερσαίας έκτασης της και αντιπροσωπεύουν σήμερα το 5% της παγκόσμιας δασικής έκτασης. Τα τελευταία 50-100 χρόνια, τα δάση της ΕΕ επεκτάθηκαν και αυξήθηκαν από πλευράς όγκου ξυλείας και αποθέματος CO<sub>2</sub> και αυτό είχε σαν αποτέλεσμα να απορροφούν περισσότερο διοξείδιο του άνθρακα από την ατμόσφαιρα. Δεν συμβαίνει όμως το ίδιο σε παγκόσμιο επίπεδο, όπου η απώλεια δασών ειδικότερα στις αναπτυσσόμενες χώρες και άλλες αλλαγές των χρήσεων γης ευθύνονται πλέον για το 12-15% περίπου των παγκόσμιων εκπομπών CO<sub>2</sub>. Τα δάση καλύπτουν σήμερα κατά προσέγγιση το 31% της στεριανής επιφάνειας της γης και η έκτασή τους φαίνεται να παρουσιάζει συνεχή μείωση.

## 2.3 Διαχείριση και Επιπτώσεις κλιματικής αλλαγής στα δασικά οικοσυστήματα

Θεωρείται πλέον γεγονός πως η αειφόρος διαχείριση, οι αναδασώσεις και η αποκατάσταση των δασών είναι καθοριστικό να αυξήσουν το ρυθμό αποθήκευσης του CO<sub>2</sub> καθώς τα δάση αλληλοεπιδρούν σε μεγάλο βαθμό με το κλίμα, παρά το γεγονός ότι η ανορθολογική χρήση αλλά και διαχείριση, η υποβάθμιση και οι αποψιλώσεις των δασών ελαττώνουν τον άνθρακα που αποθηκεύεται στα δάση (FAO 2005). Κατά συνέπεια η σωστή διαχείριση των δασών, αναμένεται ότι θα μπορούσε να αποτελέσει ένα κατάλληλο και ωφέλιμο εργαλείο στην ελάττωση του ατμοσφαιρικού διοξειδίου του άνθρακα (Kurz et al., 2002).

Ανεξάρτητα με το γεγονός ότι στα περισσότερα δάση του πλανήτη, τα δέντρα αναμένεται ότι θα προσαρμοστούν χωρίς ανθρώπινες παρεμβάσεις στην υπάρχουσα κλιματική αλλαγή, είναι δυνατόν να υφίστανται διαχείριση πολλές δασικές περιοχές, ούτως ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι δυσάρεστες επιδράσεις της προβλεπόμενης αύξησης της θνησιμότητας των δέντρων (Sturrock et al., 2011). Παρόλο λοιπόν που κάποια δασικά οικοσυστήματα τελικά αναμένεται να αυτό-προσαρμοσθούν, εντούτοις η σημασία τους για την κοινωνία επιβάλλει να γίνουν ενέργειες και παρεμβάσεις στην πορεία και στον χρονισμό της προσαρμογής αυτής σε κάποιες περιοχές (Spittlehouse and Stewart, 2003).

Για τη διατήρηση γόνιμων και παραγωγικών δασών, τα οποία είναι σε θέση να συσσωρεύουν περισσότερο άνθρακα και να παρέχουν υπηρεσίες και αγαθά στον άνθρωπο είναι αναγκαία η προσαρμοζόμενη δασική διαχείριση. Η προσαρμογή των δασών μειώνει την ευαισθησία τους στις κλιματικές αλλαγές. Τα δάση τα οποία είναι υπό διαχείριση με κατάλληλο τρόπο παρουσιάζουν πιο πολλές πιθανότητες να επιβιώσουν και να προσαρμοστούν στις κλιματικές αλλαγές. Ιδιαίτερα στο δασικό τομέα, ο σχεδιασμός της διαδικασίας της προσαρμογής αποτελεί κύριο παράγοντα για τρεις σημαντικούς λόγους:

- i. ήδη σε ορισμένες περιοχές η αλλαγή του κλίματος είτε έχει συμβεί είτε και συμβαίνει όπου τα δασικά οικοσυστήματα θεωρούνται ευαίσθητα και ευπαθή,

- ii. η εφαρμογή προληπτικών και επιθετικών μέτρων για τον έλεγχο των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου σαν μέτρο από μόνο του δεν είναι αρκετό για τον περιορισμό των συνεπειών μεταβολής του κλίματος και
- i. όσον αφορά την προσαρμογή των δασών, τα μέτρα πρόληψης είναι πιο πιθανόν να κατευθύνουν στην αποφυγή ή στην ελάττωση των αρνητικών επιδράσεων της αλλαγής του κλίματος από ότι τα θεραπευτικά (Easterling, Hurd and Smith, 2004; Ford et al., 2007; Hare and Meinshausen, 2006).

Η προσαρμογή στις κλιματικές αλλαγές εμπεριέχει οικολογικές, οικονομικές αλλά και κοινωνικές διαστάσεις. Σύμφωνα με διαφορές μελέτες (DALE *et al.*, 2001; Holling, 2001) η εφαρμογή δράσεων προσαρμογής και ο σχεδιασμός προϋποθέτουν σταδιακά:

- i. τον καθορισμό στόχων για τα δάση εν όψη των κλιματικών αλλαγών,
- ii. τον καθορισμό και την εφαρμογή προσαρμοστικών, οικονομικά αποδοτικών μέτρων,
- iii. την προσαρμογή της διαχείρισης με σκοπό το μετριασμό των συνεπειών της κλιματικής αλλαγής,
- iv. την παρακολούθηση για την κατάσταση του δάσους και το επίπεδο επιτυχίας των προσαρμοστικών μέτρων και
- v. την εκπαίδευση και ευαισθητοποίηση του κόσμου αναφορικά με προβλήματα που είναι πιθανόν να ανακύψουν στο δασοκομικό περιβάλλον (Spittlehouse and Stewart, 2003).

Παρ' όλα αυτά τα μέτρα προσαρμογής σύμφωνα με τον Duinker (1990), αν εφαρμοστούν χωρίς ιδιαίτερο προγραμματισμό είτε χωρίς να έχουν κατανοηθεί αρκετά οι βιο-φυσικές επιδράσεις είναι πιθανόν ακόμη και να χειροτερέψουν τις επιπτώσεις και τις συνέπειες της κλιματικής αλλαγής. Με άλλα λόγια η εισαγωγή παραμέτρων οι οποίες σχετίζονται με την κλιματική αλλαγή στη διαχείριση των δασών χρειάζονται πλήρη κατανόηση της ευαισθησίας των δασικών οικοσυστημάτων αλλά και της αντίδρασης τους στις κλιματικές μεταβολές. Αντιθέτως η σωστή πρόγνωση των επιπτώσεων είναι δύσκολη εξαιτίας της υπάρχουσας γνώσης αναφορικά με i) την ευπάθεια των ειδών και των οικοσυστημάτων και ii) της πρόγνωσης των μεταβολών του κλίματος.

Οι προβλέψεις ωστόσο που στηρίζονται στην αξιολόγηση της ευπάθειας σύμφωνα με τον Füssel (2007), θα μπορούσε να δίνουν ωφέλιμα αποτελέσματα, ακόμη και στην έλλειψη έγκυρων προβλέψεων των επιπτώσεων, όπως μελέτη και εκτέλεση μέτρων,

ελαχίστων ή και μηδενικών επιπτώσεων οι οποίες να ανταποκρίνονται σε ένα μεγάλο φάσμα ενδεχόμενων αλλαγών του κλίματος. Εξάλλου οι στρατηγικές “μηδενικών επιπτώσεων” σύμφωνα με τους Milad, Schaich and Konold (2013), θεωρούνται επωφελείς κάτω από πιθανά σενάρια μεταβολής κλιματικών συνθηκών. Αν και δεν έχει διαμορφωθεί ακόμη πλήρως σαφής εικόνα πώς θα διαμορφωθεί το κλίμα στο μέλλον, είναι σημαντικό να δημιουργηθούν και να εφαρμοστούν πολιτικές προσαρμογής αρκετά νωρίτερα από το σημείο που θα γίνουν φανερές οι συνέπειες από τις κλιματικές αλλαγές στα δάση (Spittlehouse and Stewart, 2003).

Καθώς η προσαρμογή της διαχείρισης είναι μία δυναμική διαδικασία, θα πρέπει τα επακόλουθα από την εφαρμογή των διαχειριστικών μέτρων να παρακολουθούνται συνέχεια και τα αποτελέσματα της παρακολούθησης να χρησιμοποιούνται για τη αδιάληπτη βελτίωση της διαχείρισης (Bolte et al., 2009).

Η προσαρμογή της διαχείρισης των δασών σύμφωνα με τους Bodin και Wiman (2007), λόγω των πολλών και ποικίλων δεδομένων αβεβαιότητας που θα μπορούσε να προκαλέσει η κλιματική αλλαγή θα πρέπει να χαρακτηρίζεται από το «μαθαίνοντας στην πράξη». Τα μέτρα που έχουν εφαρμοστεί μέχρι σήμερα για την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής αγνοούν σε μεγάλο βαθμό τις κοινωνικές ανάγκες και συγκεντρώνονται μόνο σε οικολογικά στοιχεία (Heller and Zavaleta, 2009).

Παρόλα αυτά η ανθρώπινη συμπεριφορά και ανάγκες είναι παράγοντες που καθορίζουν σε σημαντικό βαθμό τις πολιτικές διατήρησης (Watson, 2005). Χρειάζεται ένας καθολικός χειρισμός των δυσκολιών και των νέων συνθηκών που θα δημιουργηθούν ένεκα της κλιματικής αλλαγής, που θα λαμβάνει υπόψη αντικείμενα διατήρησης ειδών και οικολογίας (Heller and Zavaleta, 2009). Επιπλέον, οι αλλαγές στο χώρο του εμπορίου των δασικών προϊόντων που θα παρουσιαστούν εξαιτίας της κλιματικής αλλαγής επίκειται να παίξουν σημαίνοντα ρόλο στη διαχείριση των δασών (Perez-Garcia et al., 2002).

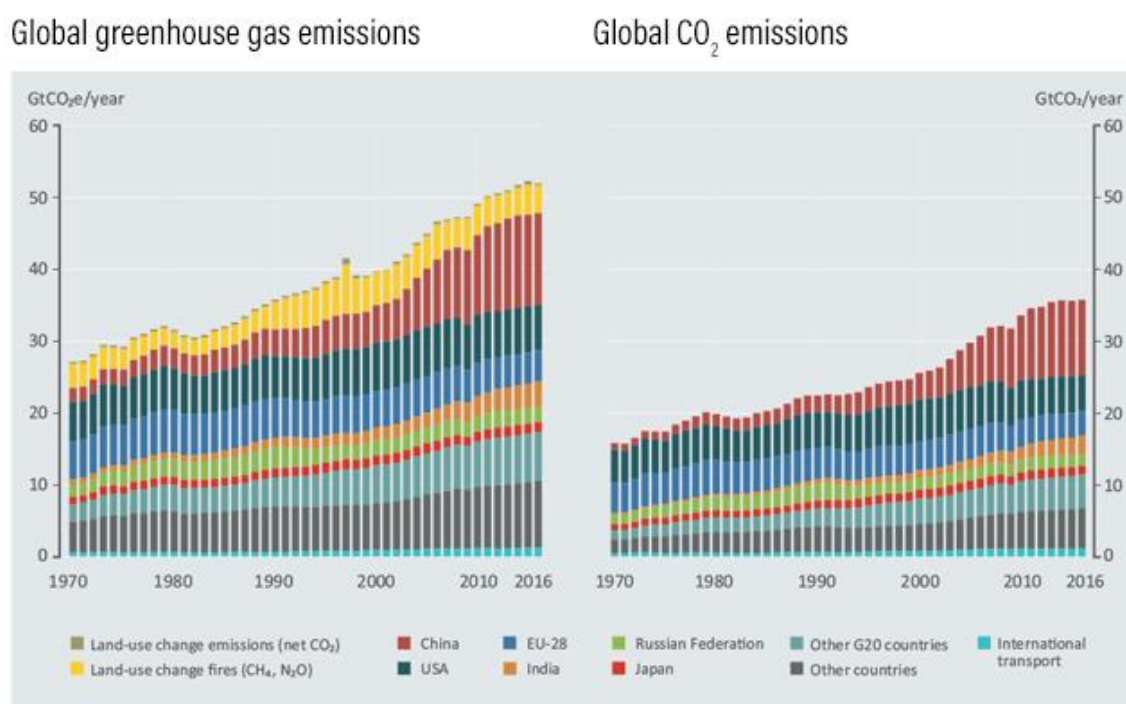
## **2.4 Δάση και διοξείδιο του άνθρακα**

Η υποβάθμιση του πλανήτη και οι καταστροφές των δασών ήταν ιδιαίτερος καθοριστικός τις τελευταίες δεκαετίες. Ο παγκόσμιος Οργανισμός Τροφίμων και Γεωργίας (FAO) υπολογίζει ότι 130.000 km<sup>2</sup> δασικών εκτάσεων καταστρέφονται κάθε χρόνο εξαιτίας της αποψίλωσης. Το κυριότερο επιβλαβές αέριο θερμοκηπίου είναι το

διοξείδιο του άνθρακα (CO<sub>2</sub>) και τα δάση δρουν ως «παγίδες» για αυτό. Όταν όμως αυτά καίγονται ή καταστρέφονται από επιβλαβείς οργανισμούς τότε μετατρέπονται σε πηγή CO<sub>2</sub>.

Παγκοσμίως περισσότερο από ένα τρισεκατομμύριο τόνοι άνθρακα (το διπλάσιο του ποσού που βρέθηκε στην ατμόσφαιρα) μπορούν να αποθηκεύσουν τα δάση σύμφωνα με εκτιμήσεις της FAO. Ταυτόχρονα οι καιρικές συνθήκες ρυθμίζονται από τα δάση σε παγκόσμιο επίπεδο. Τις τελευταίες δεκαετίες τα δάση της Ευρώπης επεκτάθηκαν στην πλειονότητά τους και αυξήθηκαν από πλευράς αποθέματος CO<sub>2</sub> και όγκου ξυλείας με επακόλουθο να απορροφούν περισσότερο διοξείδιο του άνθρακα από την ατμόσφαιρα.

Σύμφωνα με πρόσφατα στοιχεία που αφορούν σε παγκόσμιο επίπεδο κυρίως στις αναπτυσσόμενες χώρες η απώλεια δασών επιπρόσθετα με άλλες αλλαγές χρήσεων γης καταστροφικές προς το περιβάλλον ευθύνονται πλέον για το 12-15% των παγκόσμιων εκπομπών CO<sub>2</sub> (Διάγραμμα 2.1).



Note: Other G20 countries include Argentina, Australia, Brazil, Canada, Indonesia, Mexico, Republic of Korea, Saudi Arabia, South Africa and Turkey. The greenhouse gas total are expressed in terms of billions of tonnes of global annual CO<sub>2</sub> equivalent emissions (GtCO<sub>2</sub>e/year). CO<sub>2</sub> equivalent is calculated using the Global Warming Potentials (GWP-100) metric of UNFCCC as report in the IPCC Second Assessment Report, similar as has been done in the IPCC Fifth Assessment Report.

Source: *The Emissions Gap Report 2017*. UNEP.

**Εικόνα 2.3:** Παγκόσμιες Εκπομπές αερίων του Θερμοκηπίου και Διοξειδίου του Άνθρακα (Levin Kelly and Taryn, 2017).

Σύμφωνα με τους Levin Kelly και Taryn (2017), το 2016 οι ολικές εκπομπές αερίων του φαινομένου του θερμοκηπίου (Global Green House Gas-GHG emissions) ήταν γύρω

στους 52 Gigatonnes (Gt CO<sub>2e</sub>/χρόνο), από την άλλη οι εκπομπές του διοξειδίου του άνθρακα προερχόμενες από διάφορες πηγές όπως καύσιμα και παραγωγή τσιμέντου αποτελούν το 70% του συνόλου των εκπομπών. Ωστόσο αποτελεί ενθαρρυντικό και αισιόδοξο στοιχείο το γεγονός ότι η παγκόσμια αύξηση των εκπομπών αερίων κατά τα έτη 2015 και 2016 ήταν χαμηλότερη από το 1990 (except years of global economic recession) και οι ολικές εκπομπές CO<sub>2</sub> από τη χρήση καυσίμων και παραγωγής τσιμέντου παρέμειναν σταθερές κατά τα έτη 2015 και 2016.

Τα δάση διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στον παγκόσμιο κύκλο του άνθρακα, δεδομένου ότι είναι μεγάλες αποθήκες άνθρακα και εκπέμπουν τεράστιες ποσότητες CO<sub>2</sub> ετησίως (Bonan, 2008). Είναι αναγκαίο να γίνει κατανοητή η συμπεριφορά των δασών στις ατμοσφαιρικές μεταβολές (θερμοκρασία, βροχοπτώσεις, CO<sub>2</sub>) γεγονός που έχει μεγάλη σημασία για την πρόβλεψη της δυναμικής του άνθρακα στα δάση και τις συνέπειες που προκύπτουν για τα επίπεδα CO<sub>2</sub> στην ατμόσφαιρα. Μέχρι σήμερα φαίνεται ότι τα δάση λειτουργούν ως καταβόθρες άνθρακα τόσο στις τροπικές περιοχές (Phillips, 2009) αλλά και στις εύκρατες ζώνες (Boisvenue and Running, 2006). Η συχνή προτεινόμενη εξήγηση, όπως αναφέρθηκε και στην εισαγωγή, για αυτή την αύξηση βιομάζας είναι η επίδραση του αυξημένου ατμοσφαιρικού CO<sub>2</sub> από την έναρξη της βιομηχανικής επανάστασης που προκλήθηκε από καιγόμενα ορυκτά καύσιμα.

Η επίδραση που θα έχει η αύξηση των επιπέδων ατμοσφαιρικού CO<sub>2</sub> στην παραγωγικότητα των δασών και στην αποτελεσματική χρήση των υδάτων παραμένει αβέβαιη, αλλά θα έχει σημαντικές επιπτώσεις για τα μελλοντικά ποσοστά δέσμευσης άνθρακα και την ανάλογη κατανομή τους στα δάση.

Οι κύριες αποθήκες CO<sub>2</sub> άνθρακα στα δασικά οικοσυστήματα είναι η ζωντανή βιομάζα των δένδρων, η υποβαθμισμένη βλάστηση και η νεκρή μάζα των ξυλωδών υπολειμμάτων και της οργανικής ύλης του εδάφους. Ο άνθρακας που αποθηκεύεται στην υπεδάφια ζωντανή βιομάζα των δένδρων είναι συνήθως η μεγαλύτερη δεξαμενή CO<sub>2</sub> και ταυτόχρονα το άμεσα επηρεαζόμενο από την από-δάσωση και την υποβάθμιση. Έτσι η εκτίμηση και η μέτρηση του υπερκείμενου άνθρακα δασικής βιομάζας αποτελεί ένα σημαντικό στάδιο για την ποσοτικοποίηση των αποθεμάτων άνθρακα και των ροών από τα δάση.

Κατανοώντας τις επιδράσεις των δασών στις ατμοσφαιρικές αλλαγές όπως θερμοκρασία, κατακρημνίσεις αλλά και στο ποσοστό του CO<sub>2</sub> στην ατμόσφαιρα είναι σημαντικό να μελετηθεί περαιτέρω και η επίδραση της αύξησης του ατμοσφαιρικού CO<sub>2</sub> στην ίδια την αύξηση των δέντρων.

## **2.5 Μελέτη των Δακτυλίων των δέντρων**

Κατά τη διάρκεια του τελευταίου αιώνα οι ανθρώπινες δραστηριότητες οδήγησαν στην αύξηση της ποσότητας του CO<sub>2</sub> στην ατμόσφαιρα της γης (Crane, 1983). Τα δέντρα παρέχουν μακροπρόθεσμες πληροφορίες που αφορούν στην αύξηση τους και κατά συνέπεια οι πληροφορίες αυτές απαρτίζουν ένα φυσικό αρχείο για την τεκμηρίωση περιβαλλοντικών πληροφοριών. Οι δακτύλιοι των δέντρων έχουν χρησιμοποιηθεί σε διάφορες εφαρμογές για να αναδομήσουν παλαιότερες κλιματικές συνθήκες καθώς και για να αξιολογηθούν οι επιπτώσεις των κλιματικών και περιβαλλοντικών αλλαγών στην αύξηση των δέντρων.

Στη δενδροχρονολογία η αύξηση των δακτυλίων των δέντρων για ένα μεμονωμένο δέντρο εξαρτώνται από ένα σύνολο περιβαλλοντικών παραγόντων, τόσο από ανθρώπινη όσο και από φυσική προέλευση, που επηρέασαν την αύξηση του μέσα από την πάροδο του χρόνου (Fritts, Bradley and Raymond, 1978; Schweingruber, 1996; Cook, 1987). Προκειμένου να κατανοηθούν οι παράγοντες που επηρεάζουν το περιβάλλον των δένδρων είναι σημαντική η μη συσχέτιση της αύξησης τους λόγω ηλικίας ή και μεγέθους. Παρ' όλα αυτά ένα προφανές πρόβλημα είναι η μείωση της αύξησης των δέντρων σε σχέση με την ηλικία και το μέγεθος και επομένως είναι δύσκολο να μοντελοποιηθεί η διαδικασία.

Οι δακτύλιοι των δέντρων είναι στοιχεία χαρακτηριστικά που σχετίζονται άμεσα με την αύξηση των δέντρων και γι' αυτό το λόγο χρησιμοποιούνται για τη μακροχρόνια παρατήρηση και μελέτη της παραγωγικότητας των δασών και κατά συνέπεια αποτελούν πολύτιμα αρχεία για βελτίωση της κατανόησης μας όσον αφορά τη συμπεριφορά των δασών σε ακραία γεγονότα και επομένως μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην αξιολόγηση της διαδικασίας της βλάστησης αλλά και της αύξησης της. Η ανάλυση δακτυλίων των δέντρων χρησιμοποιείται συχνά για να

αξιολογηθούν οι μακροπρόθεσμες τάσεις στην αύξηση και παραγωγικότητα των δέντρων.

Η μελέτη των δακτυλίων των δέντρων είναι μια κατάλληλη μέθοδος για να υπολογισθεί ή να εκτιμηθεί ο ρυθμός ανάπτυξης του ατμοσφαιρικού CO<sub>2</sub> από την έναρξη της βιομηχανικής επανάστασης (Huang et al., 2007; Jacoby and D'Arrigo, 1997; Levin Kelly and Taryn, 2017).

Από τις πρώτες μελέτες που έγιναν που αφορούσαν την επίδραση του CO<sub>2</sub> στη αύξηση των δακτυλίων των δέντρων ήταν η έρευνα που έγινε από τους (Lamarche *et al.*, 1984). Έκτοτε έγιναν διάφορες έρευνες που υποστηρίζουν άλλες θετική και άλλες αρνητική επίδραση στην αύξηση της βλάστησης από την επίδραση του CO<sub>2</sub> (Huang et al., 2007).

Σε έρευνα που έγινε από τους Jacoby και D'Arrigo (1997) καταγράφονται δύο τρόποι μέσα από τους οποίους παρέχονται πληροφορίες από τους δακτυλίους των δέντρων που αφορούν τις αλλαγές του κλίματος και τις εκπομπές CO<sub>2</sub> στην ατμόσφαιρα:

- i) Οι παρατηρήσεις και αλλαγές οι οποίες καταγράφονται για τον προσδιορισμό του κατά πόσον η πρόσφατη αύξηση της θερμοκρασίας κατά την περίοδο της χρήσης οργάνων είναι ασυνήθιστες σε σχέση με την προηγούμενη χιλιετία και έτσι πιθανόν να σχετίζονται με την αύξηση αερίων του θερμοκηπίου και
- ii) η αξιολόγηση του κατά πόσον η έντονη και μεγαλύτερη ακτινική αύξηση των δέντρων έχει συμβεί τις τελευταίες δεκαετίες που φαίνεται να είναι ανεξήγητη από τις κλιματικές συνθήκες και αντί για αυτό μπορεί να οφείλεται σε αύξηση των ατμοσφαιρικών εκπομπών CO<sub>2</sub> ή άλλων θρεπτικών λιπάνσεων. Διαπιστώθηκε ότι ένας αριθμός μελετών των δακτυλίων των δέντρων που συμπεριλαμβάνει ευαίσθητες παραμέτρους που αφορούν τη θερμοκρασία δείχνουν ασυνήθιστες αυξήσεις στη θέρμανση αν και υπάρχουν εξαιρέσεις σε ορισμένες περιοχές. Τα διαθέσιμα αποδεικτικά στοιχεία που αφορούν τους δακτυλίους των δέντρων για πιθανή επίδραση του CO<sub>2</sub> κάτω από φυσικές συνθήκες περιβάλλοντος φαίνεται να είναι πολύ περιορισμένα σύμφωνα με τους (Jacoby and D'Arrigo, 1997).

Σε μελέτη που έγινε από τους Peters et al. (2015), περιγράφονται οι διάφορες μέθοδοι και διαδικασίες εντοπισμού της μέτρησης και αύξησης των δέντρων (GDMs - Growth-

Trend - Detection - Methods). Στη συγκεκριμένη μελέτη αναφέρθηκαν και παρουσιάστηκαν τέσσερις από τις μεθόδους που χρησιμοποιούνται ευρύτατα στην έρευνα και στην παρατήρηση των δακτυλίων των δέντρων για τη μελέτη των τάσεων ηλικίας/μεγέθους των δέντρων αλλά ταυτόχρονα τονίζεται και αναλύεται ή μη συσχέτιση και η ανεξάρτηση από μακροπρόθεσμες τάσεις αύξησης.

Παγκοσμίως τα δάση αποθηκεύουν και επεξεργάζονται μεγάλες ποσότητες διοξειδίου του άνθρακα (Pan et al., 2011). Οι όποιες αλλαγές στους ρυθμούς αύξησης των δασικών δένδρων επηρεάζουν την καθαρή πρόσληψη ή και απώλεια του άνθρακα και επομένως αυτό μπορεί να έχει μεγάλες συνέπειες για το συνολικό κύκλο και την ποσότητα του άνθρακα (Bonan, 2008).

Μια σειρά από δακτύλιους των δέντρων περιέχει πληροφορίες σχετικά με την αύξηση των δέντρων και τη συμπεριφορά τους (Schöngart et al., 2006; Subedi and Sharma, 2013). Οι δακτύλιοι αυτοί εξαρτούνται από διαφορές παραμέτρους που μεταβάλλονται στο πέρασμα του χρόνου. Οι αλλαγές που παρουσιάζονται ανα έτος εξαρτώνται από μεταβολές οι οποίες πολύ συχνά συμβαίνουν μέσα από το πέρασμα των χρόνων και πολλές φορές αιώνων, όπως για παράδειγμα οι κατακρημνίσεις και η θερμοκρασία.

Μια σειρά από μελέτες που αφορούν στους δακτύλιους των δέντρων έχουν εντοπίσει αυξημένους ρυθμούς ανάπτυξης διαχρονικά στις εύκρατες περιοχές (Gedalof and Berg, 2010; Huang et al., 2007). Το γεγονός της αύξησης του πλάτους των δακτυλίων των δέντρων ως απόδειξη της λίπανσης από το CO<sub>2</sub> χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή καθώς η ταυτόχρονη αύξηση των δέντρων και του ατμοσφαιρικού CO<sub>2</sub> συσχετίζεται επίσης άμεσα με τις ταυτόχρονες αλλαγές της θερμοκρασίας, της βροχόπτωσης, της ακτινοβολίας αλλά και των αποθεμάτων του CO<sub>2</sub> στην ατμόσφαιρα (Boisvenue and Running, 2006; Briffa et al., 2008). Επιπρόσθετα επιβάλλεται ιδιαίτερη προσοχή καθώς η παρατηρούμενη αύξηση στο πλάτος των δακτυλίων των δέντρων πιθανόν να είναι τυχαία εξαιτίας της τυχαίας επίσης επιλογής των δειγμάτων που έχουν μελετηθεί (Brienen, Gloor and Zuidema, 2012).

## **2.6 Περιοριστικοί παράγοντες και φυσιολογία ανάπτυξης φυτών.**

Η αύξηση των δασών μπορεί να συσχετιστεί ποσοτικά με τρία συστατικά, τη φυλλική επιφάνεια, την ταχύτητα καθαρής φωτοσύνθεσης και το ρυθμό αναπνοής (Teskey, 1987). Οι πιο πάνω παράγοντες εξαρτώνται από τη φυσιολογία του κάθε είδους και κατ' επέκταση τον εξειδικευμένο μηχανισμό αύξησης και κατ' επέκτασης μεταβολισμού, φωτοσύνθεσης, κυτταρικής διαίρεσης και υδραυλικών ιδιοτήτων. Η φωτοσύνθεση είναι πολύπλοκη διαδικασία που πάρα πολλοί παράγοντες επενεργούν στην εκτέλεση της και ακόμη περισσότερο υπάρχουν εξειδικεύσεις για κάθε είδος.

Η πολυπλοκότητα της προέλευσης και της εξέλιξης της φωτοσύνθεσης είναι αποτέλεσμα πολλαπλών φωτοσυνθετικών συστατικών που έχουν ανεξάρτητες εξελικτικές οδούς. Έχουν αναπτυχθεί εξελικτικά σενάρια μόνο για μερικά φωτοσυνθετικά συστατικά (Xiong and Bauer, 2002). Περίπου το 40% της ξηρής μάζας ενός φυτού αποτελείται από άνθρακα, ο οποίος δεσμεύεται στη φωτοσύνθεση. Αυτή η διαδικασία είναι ζωτικής σημασίας για την ανάπτυξη και την επιβίωση σχεδόν όλων των φυτών κατά τη διάρκεια του μεγαλύτερου μέρους του κύκλου αύξησης τους (Lambers, Chapin, and Pons, 2008).

Κρίνεται σημαντικό λοιπόν να παρατεθούν δεδομένα του τρόπου επίδρασης αυτών των φωτοσυνθετικών συστατικών τα οποία επηρεάζονται από την κλιματική αλλαγή και συνεπώς δύνανται με τη σειρά τους να επηρεάσουν το μηχανισμό αύξησης κατά είδος και κατ' επέκταση την παραγωγικότητα των δασών. Ο τρόπος που επηρεάζεται και η φωτοσύνθεση από τους παράγοντες αυτούς είναι καίριος και ενδεικτικός της αναγκαιότητας ότι πρέπει να λαμβάνονται υπόψη όταν μελετάται η παραγωγικότητα των δασών.

### **2.6.1 Διοξείδιο του άνθρακα**

Το CO<sub>2</sub> μαζί με το O<sub>2</sub> από τα αέρια έχουν καθοριστικό ρόλο στην αύξηση και ανάπτυξη των δέντρων από τα αέρια της ατμόσφαιρας. Το CO<sub>2</sub> αποτελεί τη πρώτη ύλη, μαζί με το νερό, για τη σύνθεση υδατανθράκων με τη λειτουργία της φωτοσύνθεσης. Ένα μεγάλο μέρος του άνθρακα που προέρχεται από το CO<sub>2</sub> βρίσκεται στους φυτικούς ιστούς με τη μορφή της κυτταρίνης.

Το CO<sub>2</sub> εισέρχεται στο φυτό από τα στόματα, διαχέεται ως αέριο στο μεσοκυττάριο χώρο, διαλύεται στο νερό των κυτταρικών τοιχωμάτων και πάλι με διάχυση μεταφέρεται εντός των κυττάρων όπου καταλήγει στα θυκαλοειδή των χλωροπλαστών για να χρησιμοποιηθεί. Η κίνηση αυτή εξαρτάται από το χημικό δυναμικό, μεταξύ του σημείου υψηλής συγκέντρωσης στο εξωτερικό περιβάλλον και του σημείου χαμηλής συγκέντρωσης στους χλωροπλάστες. Η κίνηση αυτή του CO<sub>2</sub> συναντά αντίσταση διάχυσης.

Οτιδήποτε επηρεάζει θετικά ή αρνητικά τη διαφορά δυναμικού ή την αντίσταση στην κίνηση του CO<sub>2</sub> δύναται να ασκήσει άμεση επίδραση και στην ταχύτητα της φωτοσύνθεσης. Ενδεικτικά η αντίσταση καταγράφεται ως αυτή του οριακού στρώματος αέρα, των στοματίων, των μεσοκυττάρων χώρων, της κίνησης εντός της υδάτινης φάσης και της χημικής αντίδρασης εντός των χλωροπλαστών (Constantinidou, 2002).

Αύξηση της συγκέντρωσης του ατμοσφαιρικού CO<sub>2</sub> πέραν περίπου του 0.05 – 0.07% προκαλείται κλείσιμο των στοματίων, γεγονός που αποτελεί δικλείδα ασφαλείας που υπερσκελίζει τη δικλείδα της έντασης του φωτός. Αύξηση του CO<sub>2</sub> πέραν ενός ορίου, το οποίο είναι διαφορετικό για κάθε είδος, προκαλεί αύξηση της αυξίνης που έχει ως συνέπεια την αύξηση του αιθυλενίου και γερασμό των ιστών (Constantinidou, 2002).

Η αφομοίωση του άνθρακα γίνεται μετατρέποντας τον ανόργανο άνθρακα σε οργανικό μέσω της διαδικασίας της φωτοσύνθεσης στα φυτά – αυτότροφοι οργανισμοί και το σχηματισμό ανθρακικών αλυσίδων. Το πρώτο βήμα σ' αυτή τη διαδικασία στους χλωροπλάστες για τη μετατροπή του ατμοσφαιρικού άνθρακα σε πλούσια σε ενέργεια μόρια όπως είναι η γλυκόζη, γίνεται με το ένζυμο Rubisco. Το Rubisco είναι σημαντικό διότι καταλύει την πρωταρχική χημική αντίδραση με την οποία ο ανόργανος άνθρακας εισέρχεται στη βίωση, στο βιολογικό κύκλο του άνθρακα ο οποίος αποδίδει τις οργανικές ενώσεις των οργανισμών (Diamantidis, 2002).

Αντικατοπτρίζοντας τη σημασία του, το Rubisco είναι η πιο άφθονη πρωτεΐνη στα φύλλα, που αντιπροσωπεύει το 50% της διαλυτής φυλλικής πρωτεΐνης στα φυτά C-3. Το CO<sub>2</sub> προσδίδεται με το Rubisco και δίνει δύο μόρια 3 – φωσφογλυκερικού οξέος. Το Rubisco αντιδρά με το CO<sub>2</sub> αλλά και με το O<sub>2</sub> στη διαδικασία της φωτοαναπνοής με την οξυγενάση. Η φωτοαναπνοή χαρακτηρίζεται ως ενεργειακά δαπανηρή διαδικασία που γίνεται κατανάλωση O<sub>2</sub>, μετατροπή του οργανικού άνθρακα σε CO<sub>2</sub>, κατανάλωση RuBP,

κατανάλωση ενέργειας για τη σύνθεση καταλάσης, σχηματισμός  $H_2O_2$  που είναι ισχυρά οξειδωτικό σώμα. Δεν γίνεται παραγωγή ενέργειας ATP και δεν γίνεται παραγωγή αναγωγικής ισχύος NADPH (Diamantidis, 2002) .

Απουσία  $CO_2$  η φωτοαναπνοή σταματά ακόμη και σε παρουσία φωτός. Καταγράφεται ότι η διαδικασία της φωτοαναπνοής δρα ως μηχανισμός των φυτών προστασίας από φωτοοξειδωση. Η φωτοαναπνοή είναι μορφή αναπνοής που συμβαίνει με την επίδραση του φωτός και ανεξάρτητα με την κανονική αναπνοή και επιταχύνεται σε υψηλές θερμοκρασίες και υψηλές εντάσεις φωτισμού. Στα C-3 η φωτοαναπνοή είναι πολύ πιο έντονη. Γίνεται στους χλωροπλάστες σε αντίθεση με την κανονική που γίνεται στα μιτοχόνδρια και απελευθερώνει  $CO_2$ . Σκοπός της φωτοαναπνοής είναι ο σχηματισμός του αμινοξέος σερίνη και όχι η παραγωγή ενέργειας (Constantinidou, 2002) .

Η διαδικασία της φωτοαναπνοής δύναται να μειώσει τη φωτοσύνθεση για δύο λόγους. Μέσω της απελευθέρωσης  $CO_2$  αυξάνεται η περιεκτικότητα του στο μεσόφυλλο με συνέπεια τη μείωση της διαφοράς συγκέντρωσης  $CO_2$  μεταξύ εξωτερικού και εσωτερικού των κυττάρων και επομένως μείωση της ταχύτητας εισόδου και πρόσληψης  $CO_2$ . Ο δεύτερος λόγος είναι εξαιτίας της υψηλής περιεκτικότητας  $CO_2$  στο μεσόφυλλο μειώνεται το pH των καταφρακτικών κυττάρων με συνέπεια να προκαλείται κλείσιμο των στοματίων (Constantinidou, 2002).

Τα ανώτερα φυτά έχουν διαμορφώσει το φωτοσυνθετικό τους μηχανισμό έτσι ώστε η άριστη συγκέντρωση  $CO_2$  για το μέγιστο της φωτοσύνθεσης τους να είναι 3-5 φορές μεγαλύτερη από τη φυσιολογική συγκέντρωση  $CO_2$  στην ατμόσφαιρα. Αυτό σημαίνει ότι κάτω από ευνοϊκές συνθήκες φωτισμού, θερμοκρασίας, θρέψης και των υπολοίπων περιοριστικούς παράγοντας είναι το  $CO_2$ . Η φωτοσυνθετική ικανότητα των φυτών εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ικανότητα πρόσληψης και αφομοίωσης  $CO_2$  και από το σημείο αντιστάθμισης  $CO_2$  ( $CO_2$  compensation point). Τη συγκέντρωση εκείνη του  $CO_2$  για τα φυτά που υπάρχει ισορροπία μεταξύ φωτοσύνθεσης και αναπνοής. Για τα φυτά τύπου C-4 τα οποία δεν έχουν φωτοαναπνοή έχουν πολύ χαμηλό σημείο αντιστάθμισης (Vogiatzis and Petridou, 2003).

Το σημείο αντιστάθμισης αναφέρεται στη χαρακτηριστική για κάθε φυτό ένταση φωτός, όπου όση ποσότητα  $CO_2$  προσλαμβάνεται από το φυτό με τη φωτοσύνθεση, τόση ακριβώς απελευθερώνεται με την αναπνοή. Μόνο εφόσον η ένταση φωτός είναι μεγαλύτερη εκείνης στο σημείο αντιστάθμισης, μπορεί να συμβεί αύξηση βάρους του

φυτού. Για τα περισσότερα είδη η ένταση φωτός στο σημείο αντιστάθμισης είναι συνήθως μικρότερη του 2% πλήρους ηλιακού φωτός (Constantinidou, 2002).

Διαφορές σε απαιτήσεις σε ένταση φωτός στα διάφορα φυτά οφείλονται κυρίως σε διαφορές του ρυθμού αναπνοής, διότι η φωτοαναπνοή είναι πολύ μικρή στις χαμηλές εντάσεις φωτός. Εάν η αναπνοή είναι αργή, τότε το φυτό απαιτεί λιγότερο φως για να φωτοσυνθέσει αρκετά, για να εξισορροπήσει το CO<sub>2</sub> που χάνει συνεπώς και η απαιτούμενη ένταση φωτός στο σημείο αντιστάθμισης είναι επίσης χαμηλή.

Η φωτοσύνθεση εξαρτάται άμεσα από τη συγκέντρωση του CO<sub>2</sub> στην ατμόσφαιρα και από την ένταση του φωτός που δέχονται τα φυτά. Εμμέσως εξαρτάται και από άλλους παράγοντες. Για παράδειγμα η θερμοκρασία η οποία ρυθμίζει τη δέσμευση του CO<sub>2</sub> αλλά και τη ταχύτητα της ενζυμικής δράσης, ρυθμίζει κατ' επέκταση τη φωτοσύνθεση. Συνεπώς όταν μελετάται η επίδραση κάποιου παράγοντα στην ταχύτητα της φωτοσύνθεσης πρέπει να λαμβάνονται υπόψη και οι υπόλοιποι. Ισχύει κατ' επέκταση ο νόμος του ελαχίστου του Liebig (1840) και η αρχή των περιοριστικών παραγόντων του Blackman (1905) (Vogiatzis and Petridou, 2003).

Δηλαδή όσον αφορά τη σχέση της συγκέντρωσης του CO<sub>2</sub> με την ένταση του φωτός και την ταχύτητα της φωτοσύνθεσης καταγράφεται ότι για συγκεκριμένη ένταση φωτός αρχικά περιοριστικός παράγοντας είναι η συγκέντρωση του CO<sub>2</sub>. Όσον αυτή αυξάνεται παίρνει μία μέγιστη τιμή, άριστη συγκέντρωση, όπου σ' αυτή παρουσιάζεται η μεγαλύτερη ταχύτητα φωτοσύνθεσης για τη συγκεκριμένη ένταση φωτός. Τώρα περιοριστικός παράγοντας είναι η ένταση φωτός που δεν επιτρέπει την περαιτέρω δέσμευση CO<sub>2</sub>.

Εάν το φυτό εκτεθεί σε φωτισμό υψηλότερης έντασης θα επαναληφθεί το ίδιο, δηλαδή θα υπάρξει μια υψηλότερη άριστη συγκέντρωση CO<sub>2</sub> και μεγαλύτερη ταχύτητα φωτοσύνθεσης μέχρι που και πάλι η ένταση του φωτός θα καταστεί περιοριστικός παράγοντας. Συνεπώς η άριστη συγκέντρωση CO<sub>2</sub> για να επιτευχθεί το μέγιστο της φωτοσύνθεσης δεν είναι σταθερή αλλά εξαρτάται και από την ένταση του φωτός. Σε χαμηλές εντάσεις φωτός τα C-3 φυτά είναι αποδοτικότερα από τα C-4 (Βόρειες χώρες).

Σε ανεπτυγμένα φυτά η μετάβαση από την κατάσταση που περιοριστικός παράγοντας είναι το CO<sub>2</sub> στην κατάσταση όπου περιοριστικός παράγοντας είναι η ένταση του φωτός δεν είναι απότομη αλλά προοδευτική. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι στη μεταβατική αυτή ζώνη εξαιτίας της αλληλοσκοκίασης των φύλλων δρουν περιοριστικά

και οι δύο παράγοντες δηλαδή για τους χλωροπλάστες που βρίσκονται στην άνω επιφάνεια του φύλλου και φωτίζονται καλύτερα ο περιοριστικός παράγοντας είναι το CO<sub>2</sub> ενώ για αυτούς που βρίσκονται πιο κάτω και σκιάζονται είναι το φως (Constantinidou, 2002).

### 2.6.2 Φως

Το φως επηρεάζει άμεσα τη φωτοσύνθεση χρησιμεύοντας σαν πηγή ενέργειας και έμμεσα προκαλώντας το άνοιγμα των στοματίων των φύλλων όταν οι συνθήκες είναι ευνοϊκές και η συγκέντρωση του CO<sub>2</sub> της στοματικής κοιλότητας είναι χαμηλή, γεγονός που επιτρέπει την ανταλλαγή αερίων (CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O), με συνέπεια την απρόσκοπτη διεξαγωγή της φωτοσύνθεσης, της αναπνοής και της διαπνοής. Επίσης επιδρά έμμεσα στη θερμοκρασία του φυτού, στη φωτοαναπνοή καθώς και στην ενεργοποίηση των ενζύμων συνεπώς επιδρά ευρύτερα στο μηχανισμό της αύξησης των δέντρων.

Το φως και το CO<sub>2</sub> είναι από τους κυριότερους παράγοντες από τους οποίους εξαρτάται η φωτοσύνθεση. Η ταχύτητα της φωτοσύνθεσης επηρεάζεται άμεσα από τη συγκέντρωση του CO<sub>2</sub> και από την ένταση του φωτός, η οποία όμως πολλές φορές αποβαίνει περιοριστικός παράγοντας εξαιτίας της πυκνότητας του φυλλώματος που προκαλεί αλληλοσκίαση.

Σε πολύ νεαρά δέντρα όπου τα φύλλα δεν επικαλύπτονται, η άριστη ένταση φωτός για τη φωτοσύνθεση εξαρτάται άμεσα από τη συγκέντρωση του CO<sub>2</sub> στην ατμόσφαιρα. Όσο υψηλότερη η συγκέντρωση του CO<sub>2</sub>, μέχρι ενός ορίου, τόσο υψηλότερο το άριστο της έντασης φωτός με την οποία επιτυγχάνεται το μέγιστο της φωτοσύνθεσης για τη συγκεκριμένη συγκέντρωση. Σε ανεπτυγμένα δέντρα και παλαιά δάση όπου τα δέντρα έχουν αποκτήσει μεγάλο μέγεθος και πλούσιο φύλλωμα, η ένταση του φωτός εξαιτίας της αλληλοσκίασης δεν φτάνει ποτέ το άριστο και η φωτοσύνθεση δεν παρουσιάζει μέγιστο ανεξαρτήτως της συγκέντρωσης CO<sub>2</sub> (Constantinidou, 2002).

Συνεπώς λοιπόν καταγράφεται ότι παρά το γεγονός ότι τα φυτά έχουν την ικανότητα να χρησιμοποιούν έως και τετραπλάσια συγκέντρωση CO<sub>2</sub> από ότι ήταν στα φυσιολογικά επίπεδα (333 ppm), ο περιοριστικός παράγοντας για τη φωτοσύνθεση και επομένως για την αύξηση των φυτών σε κανονικές συνθήκες και για ανεπτυγμένα δάση δεν είναι το CO<sub>2</sub> αλλά η ένταση του φωτός. Ο βαθμός αλληλοσκίασης των φύλλων

λοιπόν είναι άμεσα συνδεδεμένος με τη φωτοσυνθετική απόδοση (Vogiatzis and Petridou, 2003).

Ένας τρόπος έκφρασης του βαθμού πυκνότητας του φυλλώματος είναι ο Δείκτης Φυλλικής Επιφάνειας (Leaf Area Index – LAI), αποτελεί ένα από τους βασικούς καθοριστικούς παράγοντες της σταθεροποίησης του άνθρακα από τα οικοσυστήματα και αντιπροσωπεύει την ποσότητα του φωτοσυνθετικού μηχανισμού ανά μονάδα επιφάνειας γης (Korner and Arnone, 1992). Ο LAI είναι ο λόγος της φυλλικής επιφάνειας ενός φυτού ή ενός συνόλου δέντρων, προς την επιφάνεια του εδάφους που καλύπτεται από την φυλλική αυτή επιφάνεια. Ο λόγος αυτός εξαρτάται σε σημαντικό βαθμό από τον αριθμό αλλά και τη διάταξη και τον προσανατολισμό των φύλλων επάνω στο βλαστικό άξονα.

Ο LAI αποτελεί μια πολύ καλή εκτίμηση του φωτοσυνθετικού δυναμικού ενός φυτού ή μιας φυτείας και επομένως της ικανότητας του για αύξηση. Μικρή τιμή του υποδηλώνει σπατάλη φωτεινής ενέργειας που με μορφή θερμότητας χάνεται στο έδαφος, ενώ μεγάλη τιμή του σημαίνει αλληλοκάλυψη των φύλλων σε σημαντικό βαθμό. Στην άριστη τιμή του LAI το φυτό επιτυγχάνει το μέγιστο της καθαρής φωτοσύνθεσης (φωτοσύνθεση – αναπνοή) ανά μονάδα επιφάνειας εδάφους. Μαζί με το δείκτη αυτό που αποτελεί καλή ένδειξη της φωτοσυνθετικής ικανότητας της κόμης του δέντρου πρέπει να συνεκτιμώνται και άλλοι παράμετροι όπως το είδος του δέντρου και ο τρόπος βλάστησης (Vogiatzis and Petridou, 2003).

Τα φύλλα απορροφούν φωτεινή ενέργεια ανάλογα με τη θέση τους επάνω στο φυτό. Με τον όρο Σύλληψη Φωτός (Light Interception) εννοείται το ποσόν της φωτεινής ακτινοβολίας που συλλαμβάνεται από τη φυλλική επιφάνεια. Η Σύλληψη Φωτός εκφράζεται ως ποσοστό % της προσπίπτουσας φωτεινής ακτινοβολίας στην εξωτερική επιφάνεια της κόμης του δέντρου και εξαρτάται από τη πυκνότητα των δέντρων, το σχήμα και το μέγεθος της κόμης, το μέγεθος της φυλλικής επιφάνειας, τον προσανατολισμό και την εποχή από την οποία εξαρτάται το μέγεθος των φύλλων και η γωνία πρόσπτωσης των ακτινών. Το μέγιστο παραγωγής ξηράς ουσίας παρατηρείται σε Σύλληψη Φωτός 100% (Constantinidou, 2002).

Στο φυτό τα ανώτερα φύλλα απορροφούν περισσότερο φως από τα κατώτερα που σκιάζονται. Προς το εσωτερικό της κόμης υπάρχει λιγότερο φως διαθέσιμο για φωτοσύνθεση. Η ποσότητα του φωτός που εισέρχεται στην κόμη του δέντρου

εξαρτάται από την πυκνότητα του φυλλώματος και μειώνεται συνεχώς από την επιφάνεια της κόμης έως το κέντρο της. Η πορεία του φωτός διαμέσου της κόμης του δέντρου αποδίδεται με τον όρο Διείσδυση Φωτός (Light Penetration) όπου τον διέπει ο νόμος του Beer ο οποίος καθορίζει την μεταβολή της έντασης φωτεινής ακτινοβολίας όταν αυτή διέρχεται από μέσο με σταθερό συντελεστή απορρόφησης και είναι λογαριθμική συνάρτηση του LAI.

Σε ένα ανεπτυγμένο δέντρο με πλούσια κόμη τα επιφανειακά στρώματα φύλλων αν και αποτελούν μικρό ποσοστό της συνολικής φυλλικής επιφάνειας δεσμεύουν το μεγαλύτερο ποσοστό της ηλιακής ακτινοβολίας ενώ ταυτόχρονα σκιάζουν σημαντικά τα κατώτερα φύλλα. Στην περίπτωση αυτή παρατηρείται αποτελεσματική διείσδυση φωτός έως ένα μέτρο περίπου από την επιφάνεια της κόμης προς το εσωτερικό της. Έχει υπολογιστεί ότι το παραγωγικό μέρος της κόμης είναι η ζώνη που λαμβάνει τουλάχιστον 35% της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας.

Τα μεγάλης ανάπτυξης δέντρα δεν είναι αυτά που συλλαμβάνουν και τον περισσότερο φωτισμό διότι τα φύλλα τους αλληλοσκιάζονται σε μεγάλο βαθμό. Αντίθετα τα περιορισμένα σε μέγεθος δέντρα ή νεαρότερα έχουν μικρότερο ποσοστό της φυλλικής τους επιφάνειας σε συνθήκες έντασης φωτισμού λιγότερο του 30% φυσικού φωτισμού. Τα δέντρα αυτά παρόλο που έχουν λιγότερα φύλλα και επομένως συλλαμβάνουν λιγότερο φως εκμεταλλεύονται πιο αποδοτικά τη συλλαμβανόμενη φωτεινή ενέργεια.

Η ένταση του φωτός δύναται να επιδράσει στη μορφολογία των φύλλων και να προκαλέσει διαφοροποίηση των φύλλων των δέντρων και των θάμνων σε σκιοφύλλα και φωτόφυλλα. Τα φωτόφυλλα που βρίσκονται στο εξωτερικό ή το επάνω μέρος της κόμης είναι μικρότερα, παχύτερα με περισσότερα στρώματα παρεγχυματικών κυττάρων και περισσότερο δερματώδη από τα σκιοφύλλα της εσωτερικής ή χαμηλής κόμης. Τα σκιοφύλλα έχουν περισσότερα θυλακοειδή και παράγουν περισσότερες φωτοσυνθετικές χρωστικές. Τα σκιοφύλλα έχουν χαμηλή τιμή κορεσμού και χαμηλό σημείο αντιστάθμισης και μοιάζουν με τα φύλλα μεσόμορφων ειδών ενώ τα φωτόφυλλα μοιάζουν με φύλλα ξηρόμορφων ειδών (Constantinidou, 2002).

Τα αυξημένα επίπεδα CO<sub>2</sub> κάτω από πλήρη φωτισμό μπορούν να έχουν αρνητικές επιπτώσεις. Υπάρχουν διάφοροι λόγοι για τους οποίους οι υδατάνθρακες μπορεί να υπερχειλίσουν σε γονιμοποιημένα με CO<sub>2</sub> φύλλα η μειωμένη δραστηριότητα άνθρακα,

τον περιορισμό της αφομοιωμένης μεταφοράς και τον περιορισμό της φωσφορυλίωσης στους χλωροπλάστες (Korner and Arnone, 1992).

### 2.6.3 Θερμοκρασία

Η ταχύτητα της αύξησης εξαρτάται άμεσα από τη σχετική ταχύτητα της φωτοσύνθεσης και αναπνοής, δηλαδή από τη διαφορά μεταξύ σχηματιζόμενων και καταναλισκομένων υδατανθράκων. Όσο μεγαλύτερη η διαφορά αυτή υπέρ των πρώτων τόσο περισσότεροι υδατάνθρακες διατίθενται για την αύξηση. Ο συντελεστής που εκφράζει τη μεταβολή της ταχύτητας της αύξησης ή μιας άλλης λειτουργίας όταν η θερμοκρασία αυξάνεται κατά 10°C λέγεται συντελεστής θερμοκρασίας (Νόμος του van't Hol) και συμβολίζεται με το Q<sub>10</sub>.

Συνεπώς σε φυσιολογικές συνθήκες και με μέτριες θερμοκρασίες (10 - 15°C), το Q<sub>10</sub> της φωτοσύνθεσης είναι μεγαλύτερο από αυτό της αναπνοής και έτσι αρχίζει να παρατηρείται συσσώρευση υδατανθράκων. Σε υψηλότερες θερμοκρασίες (15 - 25°C) η φωτοσύνθεση συνεχίζει να αυξάνει και φθάνει στον υψηλότερο ρυθμό της όπου παραμένει σταθερή διότι ορισμένοι εξωτερικοί παράγοντες όπως CO<sub>2</sub> και φως αρχίζουν να δρουν περιοριστικά. Στο εύρος αυτό των θερμοκρασιών επιτυγχάνεται η μεγαλύτερη περίσσεια υδατανθράκων, το εύρος άριστων θερμοκρασιών, διότι παρόλο που και το Q<sub>10</sub> της αναπνοής αρχίζει να αυξάνεται γίνεται με πολύ βραδύτερο ρυθμό. Δηλαδή η ωφέλιμη (net) φωτοσύνθεση είναι η διαφορά του ολικού προϊόντος της φωτοσυνθέσεως μείον του προϊόντος που καταναλώθηκε από την μιτοχονδριακή αναπνοή και την φωτοαναπνοή (Vogiatzis and Petridou, 2003).

Στο εύρος των θερμοκρασιών 25 - 30°C ο ρυθμός της αναπνοής συνεχώς επιταχύνεται ενώ η φωτοσύνθεση εξακολουθεί να παραμένει σταθερή και έτσι το ποσόν των υδατανθράκων που περισσεύει μειώνεται συνεχώς. Σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 30°C τουλάχιστον για φυτά του τύπου C-3 η ταχύτητα της αναπνοής αυξάνει υπερβολικά με αποτέλεσμα η κατανάλωση υδατανθράκων να υπερβαίνει την παραγωγή τους και η αύξηση να αναστέλλεται. Σε θερμοκρασίες πάνω από 30°C η αύξηση της αναπνοής είναι μεγαλύτερη από την αύξηση της φωτοσύνθεσης (Constantinidou, 2002).

Η θερμοκρασία επιδρά άμεσα στη φωτοσύνθεση με την επίδραση των ενζυμικών αντιδράσεων ιδιαίτερα των σκοτεινών και έμμεσα εφόσον με υψηλή θερμοκρασία

παρατηρείται αύξηση της διαπνοής και κλείσιμο των στοματίων. Τα διάφορα ένζυμα διαφέρουν ως προς τη θερμική τους σταθερότητα. Η πτώση της δράσης τους σε υψηλές θερμοκρασίες οφείλεται σε θερμική μετουσίωση, αφυδάτωση των ενζύμων, η πρωτεΐνη συρρικνώνεται με απώλεια του εδαφικού κελύφους της (Diamantidis, 2002).

#### **2.6.4 Νερό**

Ως γενικευμένη παρατήρηση οι αντίξοοι περιβαλλοντικοί παράγοντες προκαλούν χρονική ή και ποσοτική αδράνεια στη φωτοσύνθεση και γενικά στο μεταβολισμό. Η έλλειψη νερού είναι ο κυριότερος περιοριστικός παράγοντας στη φωτοσύνθεση και γενικά στην αύξηση των φυτών. Η έλλειψη νερού στο έδαφος, προκαλεί έλλειψη νερού στο φυτό και μείωση στο ρυθμό αύξησης.

Το νερό είναι απαραίτητο συστατικό του πρωτοπλάσματος και αποτελεί το 80 – 90% του χλωρού βάρους των αναπτυσσόμενων ιστών. Αποτελεί το διαλυτικό μεταφορικό μέσο που μεταφέρει τα αέρια και άλλες ουσίες μεταξύ των κυττάρων και των οργάνων. Είναι υπόστρωμα στη φωτοσύνθεση και αναγκαίο για τη διατήρηση της σπαργής η οποία είναι απαραίτητη για την κανονική διεξαγωγή μεταβολικών διεργασιών στο κύτταρο με το νερό ως διαλυτικό μέσο και για την αύξηση του κυττάρων. Επιπλέον μείωση της σπαργής των καταφρακτικών κυττάρων προκαλεί κλείσιμο των στοματίων.

Η φωτοσύνθεση μειώνεται καθώς η εδαφική υγρασία ελαττώνεται, όμως η κρίσιμη υγρασία εδάφους που προκαλεί την πρώτη φωτοσυνθετική μείωση δεν έχει ακριβώς καθοριστεί. Θεωρείται από πολλούς ερευνητές ότι η έλλειψη νερού στο έδαφος είναι αλληλένδετη με έλλειψη νερού στο φυτό. Κάποιοι ερευνητές αναφέρουν ότι η φωτοσύνθεση ελαττώνεται αμέσως μόλις το έδαφος έχει ξεραθεί ελαφρά όταν το εδαφικό νερό έχει πια εξαντληθεί (Vogiatzis and Petridou, 2003).

Όμως η παραδοχή αυτή επιδέχεται αμφιβολίας διότι φυτά που μεγαλώνουν σε ξηρό έδαφος δεν παρουσιάζουν εσωτερική έλλειψη νερού αν η σχετική υγρασία του αέρα είναι μεγάλη και αντίθετα. Το ίδιο συμβαίνει εάν συγχρόνως υπάρχει άπνοια και αν η θερμοκρασία των φύλλων είναι ίση με τη θερμοκρασία της ατμόσφαιρας γεγονός που συμβαίνει σε μια συννεφιασμένη ημέρα με νηνεμία. Επιπλέον η ποσότητα του νερού μέσα στο φυτό δεν εξαρτάται μόνο από το ρυθμό απορρόφησης από τη ρίζα αλλά από τη σχέση μεταξύ απορρόφησης και διαπνοής (Constantinidou, 2002).

Η σημασία της εσωτερικής κατάστασης της υγρασίας του φυτού για το φωτοσυνθετικό μηχανισμό φαίνεται από την ημερήσια διακύμανση της φωτοσύνθεσης. Ένας από τους κύριους λόγους της διακύμανσης αυτής είναι η ρύθμιση της κίνησης των στοματίων από το φυτό προκειμένου να εξοικονομηθεί νερό. Σε ώρες της ημέρας με υψηλές θερμοκρασίες μπορεί να παρουσιασθεί έλλειψη νερού στα φύλλα ακόμη και όταν το έδαφος είναι σχετικά υγρό επειδή ο ρυθμός διαπνοής υπερβαίνει το ρυθμό απορρόφησης του νερού. Συνεπώς για να ανταπεξέλθει το φυτό τα στομάτια κλείνουν, η φωτοσύνθεση σταματάει και αρχίζει όταν αποκατασταθεί το θετικό ισοζύγιο νερού.

Η σημαντικότητα των παραγόντων του CO<sub>2</sub>, της θερμοκρασίας, του φωτός και του νερού και των παραμέτρων που τους επηρεάζουν όπως το είδος βλάστησης, η θέση, ο προσανατολισμός, το υψόμετρο, η ηλικία στην αύξηση των δέντρων και η ανάγκη συνεκτίμηση τους όταν μελετάται η επίδραση τους σ' αυτήν, επιβεβαιώνεται από αρκετές εργασίες που έχουν μελετήσει την επίδραση του αυξημένου ατμοσφαιρικού CO<sub>2</sub> στην ανάπτυξη των δέντρων.

Για παράδειγμα στην εργασία των Körner, et al. (2005) που μελετώνται τα είδη *Quercus petraea*, *Fagus sylvatica*, *Prunus avium*, *Carpinus betulus*, *Tilia platyphylloides* και *Acer campestre* εντοπίζεται ότι η αύξηση του ατμοσφαιρικού CO<sub>2</sub> ενδεχομένως σε κάθε είδος να έχει επιδράσει σε διαφορετικό μηχανισμό, χωρίς όμως να επιδρά γενικότερα στην ανάπτυξη τους. Επίσης στην εργασία των Vila, et al. (2008) εντοπίζεται διαφοροποίηση της αντίδρασης τους είδους *Pinus sylvestris* στο αυξημένο CO<sub>2</sub> της ατμόσφαιρας σε σχέση με τη θέση μελέτης και ειδικότερα με το υψόμετρο. Αναμένεται λοιπόν ότι τα είδη ακόμη και τα δάση θα αντιδρούν διαφορετικά ανάλογα με το υψόμετρο ανεξάρτητα με το πια θα είναι η συγκέντρωση του ατμοσφαιρικού CO<sub>2</sub>.

## **2.7 Επίδραση θέσης βλάστησης στην παραγωγή των δασών (Υψόμετρο και γεωγραφική κατανομή είδους)**

Η ανταπόκριση των ειδών στο αυξημένο CO<sub>2</sub> είναι εξειδικευμένη για κάθε είδος (Körner et al. 2005). Πλησίον των ορίων της φυσικής γεωγραφικής κατανομής των ειδών οι κλιματικοί παράγοντες γίνονται περιοριστικοί στις φυσιολογικές συνθήκες της αύξησης των δέντρων. Στα σημεία εκείνα το κλίμα αναμένεται να έχει σημαντικές επιδράσεις στην αύξηση των δέντρων και στη διαφοροποίηση της γεωγραφικής κατανομής των

ειδών (Vila et al., 2008). Ανάλογα εάν η θέση ενός είδους είναι στα ξηροθερμικά, ενδιάμεσα ή ψυχροόρια του οι περιοριστικοί παράγοντες στην αύξηση διαφοροποιούνται.

Όταν η θέση βλάστησης ενός είδους είναι στα νότια όρια της εξάπλωσης του σε χαμηλό υψόμετρο δύναται να χαρακτηριστεί ότι είναι στα ξηροθερμικά όρια του και περιοριστικός παράγοντας είναι η υγρασία. Καθώς όμως η θέση βλάστησης μετακινείται σε υψηλότερα υψόμετρα, στις ίδιες συντεταγμένες, τότε η κατάσταση διαφοροποιείται προς τα ενδιάμεσα και ψυχροόρια του είδους όπου περιοριστικός παράγοντας είναι η θερμοκρασία. Το ίδιο συμβαίνει καθώς η θέση βλάστησης μετακινείται βορειότερα στην κατανομή του είδους πάλι προς τα ψυχροόρια.

Στο είδος *Pinus sylvestris* στη νότια Γαλλία που είναι στο νότιο άκρο της κατανομής του είδους, παρουσιάζεται διαφοροποίηση στην αύξηση των δέντρων. Μη επίδραση της παραγωγικότητας σε χαμηλά υψόμετρα και επίσης καθόλου έως και αύξηση της σε υψηλά υψόμετρα. Ενώ το είδος *Pinus halepensis* επίσης στη νότια Γαλλία όπου είναι το βόρειο σημείο της κατανομής του παρουσιάζει αύξηση σε όλα τα υψόμετρα γεγονός που δεικνύει ότι οι κλιματολογικοί παράγοντες έχουν ευνοήσει τις συνθήκες ανάπτυξης του είδους σε περιοχή κοντά στα βόρεια όρια της εξάπλωσης του (Vila et al., 2008).

Οι επιστημονικές θεωρίες που προβλέπουν θετική επίδραση της αύξησης του ατμοσφαιρικού CO<sub>2</sub> στην παραγωγικότητα των δασών προβλέπουν ότι αυτό θα γίνει είτε άμεσα μέσω της αέριας λίπανσης των δέντρων είτε έμμεσα βελτιώνοντας την αποδοτικότητα χρήσης νερού (Water Use Efficiency) σε ξηρές περιοχές. Σε ψυχρό κλίμα όμως με μεγάλο υψόμετρο η θεωρία επιδέχεται αμφισβήτησης ένεκα του γεγονότος ότι περιοριστικός παράγοντας είναι η θερμοκρασία η οποία αυξάνεται (Camarero, Gazol, Tardif, et al., 2015).

Υπάρχουν ήδη στοιχεία που δεικνύουν ότι είδη βλάστησης που βρίσκονται στα ξηροθερμικά τους όρια όπως αυτά της ανατολικής Μεσογείου κοντά στο επίπεδο της θάλασσας έχουν επηρεαστεί αρνητικά από την ετήσια μείωση των κατακρημνίσεων (Sarris, et al. 2007). Στα ξηροθερμικά όρια ο πιο ισχυρός περιοριστικός παράγοντας είναι η υγρασία. Τα είδη που βρίσκονται σε ξηρούς βιότοπους και στα όρια της γεωγραφικής εξάπλωσης τους ως προς το γεωγραφικό πλάτος αναμένεται να έχουν ισχυρές αποκρίσεις στη ξηρασία (Sarris, Christodoulakis and Korner, 2010).

Από μελέτη που έχει γίνει στο είδος *Pinus halepensis* στην περιοχή του ανατολικού Αιγαίου στο νησί της Σάμου φαίνεται ότι ο πληθυσμός του είδους εκεί έχει υποστεί μια σημαντική μείωση της αύξησης του μετά τα τέλη της δεκαετίας του 1970, φτάνοντας στα χαμηλότερα επίπεδα τη δεκαετία του 1990. Η παραγωγή του πληθυσμού αυτού που ακολουθούσε τη τάση των κατακρημνίσεων οδήγησε το είδος στα όρια της επιβίωσης του ενώ τα μεγαλύτερα σε ηλικία δέντρα έχουν υποστεί θανατηφόρο αποξήρανση στα τέλη του καλοκαιριού του 2000 η οποία αποδίδεται στη μεγάλη ξηρασία του έτους (Sarris, et al. 2007). Ίδιες συνέπειες παρουσιάστηκαν και σε άλλα είδη στην περιοχή με τα *Juniperus phoenicea* και *Phillyrea latifolia* να έχουν επηρεαστεί περισσότερο και τα *Quercus coccifera* η Αγριελιά και *Pistacia lentiscus* λιγότερο (Körner et al. 2005).

Ενδέχεται ένα είδος να παρουσιάσει διαφοροποίηση στην ανταπόκριση του στους κλιματολογικούς παράγοντες ακόμη και σε μικρό εύρος έκτασης γης. Το είδος *Cedrus brevifolia* στην κοιλάδα των κέδρων στην Κύπρο παρουσιάζει διαφορετική απόκριση στους κλιματολογικούς παράγοντες ανάλογα με τη θέση του είδους εάν είναι στο χαμηλό ξηρό σημείο 1280μ. σε σχέση με τη νότια πιο υγρή πλευρά της κοιλάδας σε υψόμετρο 1380μ. Το είδος *Picea abies* στην περιοχή Jura της Ελβετίας παρουσιάζει θετική απόκριση σε θέσεις με περισσότερη υγρασία σε σχέση με άλλες θέσεις στην ίδια περιοχή (Kienast and Luxmoore, 1988).

Σε περιοχές με μεγάλες περιόδους ξηρασίας όπως είναι η Μεσόγειος αναμένεται ότι η βλάστηση των δέντρων στα ξηροθερμικά όρια τους δηλαδή σε χαμηλό υψόμετρο και στα νότια όρια της γεωγραφικής κατανομής τους θα επηρεαστεί αρνητικά σε σημαντικό βαθμό. Οι πυρκαγιές που ξεκινούν σε χαμηλά υψόμετρα μπορούν να εξαπλωθούν ευκολότερα σε απόσταση και ύψος υπό μελλοντικές συνθήκες μειωμένης υγρασίας. Η μειωμένη χρήση της γης και η παρείσφρηση χαμηλής βλάστησης και θάμνων σε πρώην γεωργική γη θα ενισχύσουν αυτόν τον κίνδυνο. Τα δύο αυτά γεγονότα αναμένεται να αυξήσουν την πίεση που θα ασκηθεί στους πληθυσμούς των ειδών που βρίσκονται στα ξηροθερμικά όρια τους και στις περιοχές αυτές (Sarris, Christodoulakis and Korner, 2010).

Οι επιπτώσεις της θερμοκρασίας στην αύξηση των δέντρων επηρεάζονται έντονα από τη διαθεσιμότητα θρεπτικών συστατικών και την απορρόφηση τους. Αν και η διαφοροποίηση της δασικής παραγωγικότητας με αυξανόμενο γεωγραφικό πλάτος υπογραμμίζει τον πρωταρχικό ρόλο ελέγχου του κλίματος στην παραγωγή, ειδικά στα

δάση των κωνοφόρων (Girardin et al., 2011), δευτερογενείς παράγοντες όπως η γονιμότητα του εδάφους και η ηλικία, παράγοντες που λειτουργούν με μεγαλύτερη χρονική υστέρηση, μπορεί να μετριάσουν τις άμεσες επιπτώσεις της θέρμανσης του κλίματος και της επίδρασης του CO<sub>2</sub> (Körner et al. 2005).

Μελέτες σε δάση έδειξαν ότι τα πρότυπα κατανομής φύλλων, στελεχών και ριζικής βιομάζας στα δέντρα, έδειξαν σημαντικά διαφορετικές τάσεις ανάλογα με το γεωγραφικό πλάτος, το γεωγραφικό μήκος και το υψόμετρο και ήταν θετικές και συσχετίζεται σημαντικά με την ηλικία των δέντρων και τη μέση ετήσια βροχόπτωση. Οι συναλλαγές μεταξύ των φύλλων, των στελεχών και των ριζών ποικίλλουν ανάλογα με τον τύπο και την προέλευση των δασών και εξηγούνται κυρίως από τη συγκεκριμένη βιομάζα στο σημείο μελέτης. Με βάση τους περιορισμούς της βιομάζας, η κατανομή της βιομάζας επηρεάζεται από τον τύπο δάσους, την προέλευση, την ηλικία και την πυκνότητα της βλάστησης, τη μέση ετήσια θερμοκρασία, τις κατακρημνίσεις και τη μέγιστη θερμοκρασία κατά την περίοδο αύξησης (Zhang, et al., 2015).

Όσον αφορά τη Μεσόγειο η ευαισθησία των ειδών στις παγκόσμιες μεταβολές του κλίματος μπορεί να οδηγήσει σε ξεχωριστές χωρικές αποκρίσεις που αντικατοπτρίζουν την πολυπλοκότητα του μεσογειακού κλίματος, με μεγάλες διαφορές μεταξύ των διαφόρων περιοχών της λεκάνης απορροής. Σε μελέτες που έγιναν στο είδος *Abies alba* στις οροσειρές των Άλπεων και των Απέννινων στους δακτυλίους των δέντρων, δείχνουν σαφή διάκριση μεταξύ των αλπικών και των μεσογειακών περιοχών και ένα περαιτέρω διαχωρισμό της περιοχής των Άλπεων στους δυτικούς και ανατολικούς τομείς. Η γεωγραφική κατανομή του και η προσαρμοστική του ικανότητα στη μεταβολή του κλίματος, που εκφράζεται στις σειρές ανάπτυξης των δακτυλίων των δένδρων, το καθιστούν ένα πολύ κατάλληλο είδος-στόχο για τη μελέτη των αποκρίσεων στο κλίμα, ιδιαίτερα σε μια περίπλοκη περιοχή όπως η μεσογειακή λεκάνη, όπου αναμένονται σημαντικές αλλαγές. (Carrer, Nola, Motta and Urbinati, 2010).

Η χωρική μεταβλητότητα στην ανάπτυξη των δένδρων είναι ένας εξαιρετικός δείκτης του περιφερειακού κλίματος. Σε μελέτες που έγιναν σε δάση στο οροπέδιο του Θιβέτ έδειξαν τα δέντρα έδειξαν διαφορετικές αποκρίσεις στην αύξηση τους σε σχέση με τον προσανατολισμό και το υψόμετρο (Liang, Shao, Eckstein and Liud, 2010).

Η ηλικία των δένδρων, οι συνθήκες υγρασίας της καλλιεργητικής περιόδου και οι μεταβολές της θερμοκρασίας του αέρα περιβάλλοντος που προέκυψαν από τις

διαφορές θέσης (γεωγραφικό μήκος, γεωγραφικό πλάτος και υψόμετρο), εξηγούν τη διαφορετικότητα που παρουσιάζεται στη σχέση μεταξύ κλίματος και της αύξησης των δέντρων ανάλογα με τη θέση μελέτης (Wang, Zhang and McRae, 2009).

Διαφαίνεται λοιπόν ότι οι παράγοντες που επηρεάζουν την αύξηση και κατ' επέκταση την παραγωγικότητα των δέντρων είναι πάρα πολλοί και η συσχέτιση μεταξύ τους έντονη. Η διαδικασία της αύξησης των δέντρων είναι τόσο περίπλοκη που επιβάλλεται ιδιαίτερη προσοχή στη μελέτη των παραγόντων που την επηρεάζουν. Ως εκ τούτου κατά την ανάλυση των εργασιών κρίνεται απαραίτητο όπως καταγραφεί κάθε δυνατή πληροφορία η οποία μπορεί να δώσει περαιτέρω στοιχεία για τη θέση μελέτης των εργασιών, όπως υψόμετρο, συντεταγμένες, τάσεις θερμοκρασίας και κατακρημνίσεων και θέση του πληθυσμού στη γεωγραφική κατανομή του είδους.

# Κεφάλαιο 3

## 3 Μεθοδολογία

Ο τρόπος που δύναται να επιδράσει η αύξηση της συγκέντρωσης του ατμοσφαιρικού CO<sub>2</sub> στην παραγωγικότητα των δασών αποτελεί ένα ζήτημα που έχει απασχολήσει την επιστημονική κοινότητα ποικιλοτρόπως. Παρουσιάζεται η τάση να χρησιμοποιείται ως επιχείρημα για το μετριασμό των συνεπειών της κλιματικής αλλαγής και ειδικά των εκπομπών άνθρακα από την περαιτέρω δέσμευση του CO<sub>2</sub> στο μηχανισμό της φωτοσύνθεσης στα δάση. Γεγονός που θα επιδρά ευεργετικά στην παραγωγικότητα των δασικών οικοσυστημάτων διαμέσου της αέριας λίπανσης.

Ανεγείρονται προβληματισμοί σχετικά για τις τάσεις που παρουσιάζονται στην επιστημονική βιβλιογραφία και τον τρόπο που αυτές διαμορφώνονται. Ποιος είναι ο αντίκτυπος αυτών των τάσεων στην επιστημονική κοινότητα. Με ποιο τρόπο έχει γίνει η επιστημονική προσέγγιση του θέματος, ποιοι παράγοντες έχουν ληφθεί υπόψη στον υπολογισμό, που δύναται να επηρεάζουν την παραγωγικότητα των δασών πέραν από τη συγκέντρωση του CO<sub>2</sub> και τη μεθοδολογία που έχει ακολουθηθεί για την εξαγωγή των συμπερασμάτων.

Η αύξηση του ατμοσφαιρικού CO<sub>2</sub> και οι συνέπειες της κλιματικής αλλαγής η άνοδος της θερμοκρασίας, η διακύμανση των κατακρημνίσεων και παράγοντες όπως η θέση του πληθυσμού στη γεωγραφική κατανομή του είδους οι συντεταγμένες, το υψόμετρο, το φως, η πυκνότητα και η ηλικία της βλάστησης, η γονιμότητα του εδάφους και η διαθεσιμότητα θρεπτικών στοιχείων είναι παράμετροι που επηρεάζουν την πιθανή αυξομείωση της παραγωγικότητας των δασών. Συνεπώς οποιαδήποτε αλλαγή στην παραγωγικότητα των δασών χρειάζεται να συνδέεται και να συνυπολογίζει τις πιο πάνω παραμέτρους εξειδικευμένα για κάθε είδος που τίθεται προς μελέτη.

Στόχος λοιπόν της διατριβής είναι η καταγραφή των τάσεων που υπάρχουν στη βιβλιογραφία και του τρόπου που καταλήγουν στα συμπεράσματά τους. Με ποιο τρόπο

συνδέεται η οποιαδήποτε απόκριση της αύξησης των δέντρων με την άνοδο της συγκέντρωσης του ατμοσφαιρικού CO<sub>2</sub>. Να διερευνηθεί ο αντίκτυπος στην επιστημονική κοινότητα των εργασιών ανάλογα με το αποτέλεσμα τους. Να γίνει προσπάθεια εντοπισμού των περιοριστικών παραγόντων για κάθε θέση μελέτης των εργασιών αυτών και συσχέτιση της τους με τα αποτελέσματα των εργασιών.

Για να καταστεί εφικτός ο στόχος της διατριβής χρειάστηκε πρωτίστως να γίνει αναζήτηση των εργασιών που έχουν μελετήσει την επίδραση της αύξησης του CO<sub>2</sub> στην ατμόσφαιρα στην παραγωγικότητα των δασών. Η αναζήτηση των εργασιών έγινε μέσω διαδικτύου το 2018. Για την εύρεση των εργασιών χρησιμοποιήθηκε η μηχανή αναζήτησης του Google Scholar.

Στη μηχανή αναζήτησης χρησιμοποιήθηκαν οι λέξεις κλειδιά CO<sub>2</sub>, fertilization, water use efficiency (WUE), productivity, growth, drought, forest. Οι λέξεις κλειδιά χρησιμοποιήθηκαν όλες μαζί, είτε συνδυασμός τους, είτε μόνες τους.

Έγινε καταγραφή των εργασιών στον πίνακα 4.1. Στον πίνακα καταγράφηκαν οι δείκτες Αναφορά Δημοσίευσης, Impact Factor, Ημερομηνία, Αριθμός Αναφορών, Τοποθεσία, Μεθοδολογία, Είδος Δέντρων / Βλάστησης, Λέξη κλειδί και Αποτέλεσμα.

Όπου Αναφορά Δημοσίευσης εννοείται οι συγγραφείς της έρευνας, το Impact Factor και Αριθμός Αναφορών όπου αυτοί δίνονταν από τις πληροφορίες των εργασιών, η ημερομηνία δημοσίευσης, η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε, η τοποθεσία και το είδος βλάστησης που μελετήθηκε, οι λέξεις κλειδιά που δίνονταν από τις εργασίες και όπου αποτέλεσμα Α, εάν η εργασία κατέληγε σε συμπέρασμα αύξησης της παραγωγικότητας της βλάστησης και Μ όπου η εργασία κατέληγε σε συμπέρασμα μη επίδρασης στην παραγωγικότητα της βλάστησης από την αύξηση του ατμοσφαιρικού CO<sub>2</sub>.

Καταγράφηκε ο Αριθμός Αναφορών και το Impact Factor με στόχο να αποτελέσουν ένα δείκτη για τον αντίκτυπο των εργασιών στην επιστημονική κοινότητα. Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε στις εργασίες καταγράφηκε ως μηχανισμός επιλογής αυτών που έχουν προκύψει από έρευνα πεδίου. Υπάρχει αδυναμία στον εντοπισμό των περιοριστικών παραγόντων στις εργασίες που έχουν γίνει σε ελεγχόμενο περιβάλλον, σε θερμοκήπια και με τη χρήση μοντέλων.

Έγινε ταξινόμηση των εργασιών ως προς το αποτέλεσμα και τον αριθμό αναφορών στον πίνακα 4.2. Η ανάλυση του αποτελέσματος της ταξινόμησης καταγράφεται στον πίνακα 4.3. όπου υπολογίζεται η αναλογία αριθμού αναφορών ανά εργασία σε σχέση με τα αποτελέσματα που είναι ο δείκτης του αντίκτυπου των εργασιών στην επιστημονική κοινότητα. Ακολούθως έγινε επιλογή των εργασιών με βάση των δεδομένων της μεθοδολογίας και απορρίφθηκαν αυτές στις οποίες δεν έγινε έρευνα πεδίου ή είχαν χρησιμοποιήσει μοντέλα για καταλήξουν σε συμπέρασμα.

Στους πίνακες 4.4. και 4.5. έγινε ταξινόμηση των εργασιών που επιλέγηκαν με τον ίδιο τρόπο όπως έγινε και στους πίνακες 4.2 και 4.3. Έπειτα με βάση τα δεδομένα της τοποθεσίας και των συντεταγμένων οι εργασίες τοποθετήθηκαν σε παγκόσμιο χάρτη ο οποίος ήταν ενδεικτικός για την περαιτέρω ανάλυση και αντιπαραβολή της θέσης μελέτης των εργασιών με τα δεδομένα της τάσης της θερμοκρασίας και των κατακρημνίσεων στη συγκεκριμένη περιοχή.

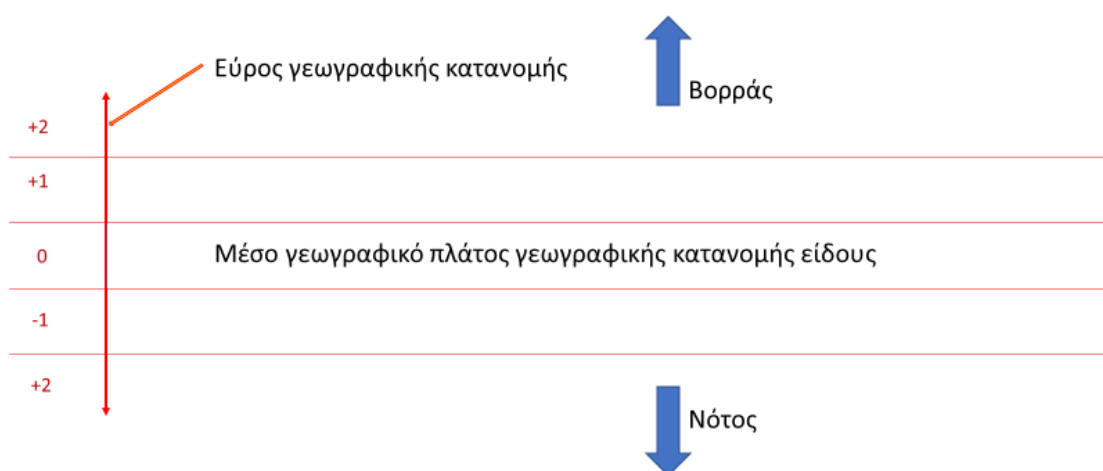
Για τον εντοπισμό των περιοριστικών παραγόντων έγινε αναζήτηση δεδομένων για τις τάσεις της θερμοκρασίας και των κατακρημνίσεων στις περιοχές μελέτης των εργασιών που φαίνονται στις εικόνες 4.2. μέχρι 4.11. Η καταγραφή των τάσεων αυτών φαίνεται στον πίνακα 4.7. Όπως έχει αναλυθεί στην εισαγωγή στους παράγοντες που επηρεάζουν την αύξηση των δέντρων και κατ' επέκταση την παραγωγικότητα των δασών είναι το υψόμετρο και η θέση του πληθυσμού που μελετήθηκε στη γεωγραφική κατανομή του είδους.

Συνεπώς για να καταστεί δυνατή η διερεύνηση των πιο πάνω παραγόντων έγινε αρχικά καταγραφή του υψομέτρου των θέσεων μελέτης των εργασιών. Το υψόμετρο καταγράφεται στον πίνακα 4.7. με τη διαβάθμιση A,B,C και D, όπως εξηγείται στον πίνακα 3.1. Για να προσδιοριστεί ο τρόπος απόκρισης του πληθυσμού που μελετήθηκε σε κάθε εργασία σε σχέση πέραν από το υψόμετρο αλλά και τη θέση του στη γεωγραφική κατανομή του είδους και επομένως των θερμικών ορίων εξάπλωσης του έγινε έρευνα των γεωγραφικών κατανομών των ειδών που μελετήθηκαν.

**Πίνακας 3.1.** Διαβάθμιση υψομέτρου.

Διαβάθμιση Υψομέτρου	
Υψος	Βαθμίδα
0 - 500μ.	A
500 - 1500μ.	B
1500 - 3000μ.	C
3000 -	D

Στον πίνακα 4.6. καταγράφηκαν τα είδη που μελετήθηκαν στις εργασίες, η συχνότητα μελέτης και το αποτέλεσμα. Έγινε αναζήτηση και καταγραφή της θέσης μελέτης των εργασιών στη γεωγραφική κατανομή του είδους η οποία φαίνεται στις εικόνες 4.12 μέχρι 4.75. Για σκοπούς περαιτέρω ανάλυσης έγινε κλίμακα για τον προσδιορισμό της θέσης μελέτης ως προς το μέσο γεωγραφικό πλάτος της κατανομής του είδους που φαίνεται στην εικόνα 3.1. Η γεωγραφική κατανομή χωρίστηκε σε πέντε τμήματα +2,+1,0,-1,-2 με το σημείο +2 να είναι το βορειότερο και το σημείο -2 το νοτιότερο. Τα αποτελέσματα καταγράφονται στον πίνακα 4.7.



**Εικόνα 3.1.** Κλίμακα που χρησιμοποιήθηκε για τον προσδιορισμό της θέσης μελέτης σε σχέση με το μέσο γεωγραφικό πλάτος της κατανομής του είδους.

Τα δεδομένα του υψομέτρου και της θέσης του πληθυσμού που μελετήθηκε στη γεωγραφική κατανομή του είδους χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό των θερμικών ορίων εξάπλωσης του είδους ως προς ξηροθερμικά, ενδιάμεσα και ψυχροόρια με τη διαβάθμιση που φαίνεται στον πίνακα 3.2.

**Πίνακας 3.2.** Διαβάθμιση θερμικών ορίων εξάπλωσης των ειδών

<b>Διαβάθμιση θερμικών ορίων εξάπλωσης των ειδών</b>	
<b>Υψόμετρο</b>	<b>Βαθμίδα</b>
0 -500μ.	ξηροθερμικά
500- 1500μ.	ενδιάμεσα
1500 -	ψυχροόρια

Τονίζεται ότι στις περιπτώσεις των ειδών που ο δείκτης του υψομέτρου ήταν Α δηλαδή κάτω από τα 500μ. αλλά στην κλίμακα της γεωγραφικής κατανομής είχε τις τιμές 0,+1 και +2 αυτό κατατασσόταν ως ενδιάμεσο ως προς το θερμικά όρια εξάπλωσης των ειδών. Οι κατάταξη αυτή καταγράφεται στον πίνακα 4.7. Στον πίνακα 4.7. γίνεται καταγραφή των εργασιών κατά τις θέσεις μελέτης ή τα είδη που έχουν μελετήσει. Έχουν προκύψει 99 περιπτώσεις.

Στον πίνακα 4.7. έγινε ταξινόμηση με βάση τα δεδομένα της στήλης των ξηροθερμικών ορίων βλάστησης σε σχέση με το υψόμετρο της θέσης μελέτης. Από την ταξινόμηση έγινε καταγραφή των δεδομένων για τις θέσεις μελέτης που έδειξαν: Αύξηση σε ενδιάμεση κατανομή, Μη μεταβολή σε ενδιάμεση κατανομή, Αύξηση σε ξηροθερμικά όρια, Μη μεταβολή σε ξηροθερμικά όρια, Αύξηση σε ψυχροόρια, Μη μεταβολή σε ψυχροόρια καθώς και οι τάσεις της θερμοκρασίας και των κατακρημνίσεων στις θέσεις αυτές όπως φαίνονται στον πίνακα 4.7. Έγινε προβολή των αποτελεσμάτων του πίνακα 4.7. στα διαγράμματα 4.1, 4.2. και 4.3.

Η ανάλυση αυτή που έγινε στον πίνακα 4.7. αποσκοπεί στον προσδιορισμό των περιοριστικών παραγόντων στα έξι σημεία αυτά της θερμικής εξάπλωσης των ειδών και συσχέτισης τους με τα αποτελέσματα των εργασιών.

# Κεφάλαιο 4

## 4 Αποτελέσματα

Σε αυτό το τμήμα της μεταπτυχιακής διατριβής καταγράφονται τα αποτελέσματα της εργασίας που έγινε και των αναλύσεων. Στον πίνακα 4.1. καταγράφονται οι εργασίες που έχουν ερευνηθεί στις οποίες αναζητήθηκαν τα δεδομένα Αναφορά Δημοσίευσης, Impact Factor, Ημερομηνία, Αριθμός Αναφορών, Τοποθεσία, Μεθοδολογία, Είδος Δέντρων / Βλάστησης, Λέξη κλειδί, Αποτέλεσμα. Στη στήλη του πίνακα που περιγράφεται το αποτέλεσμα όπου Α σημαίνει ότι η εργασία καταλήγει σε συμπέρασμα θετικής απόκρισης της παραγωγικότητας των δασών στο ατμοσφαιρικό CO<sub>2</sub> και όπου Μ, μη μεταβολής.

Αναφορά Δημοσίευσης, Impact Factor, Ημερομηνία, Αριθμός Αναφορών, Τοποθεσία, Μεθοδολογία, Είδος Δέντρων / Βλάστησης, Λέξη κλειδί, Αποτέλεσμα, Ύψόμετρο, Τάση θερμοκρασίας της θέσης μελέτης από ανάλυση της διατριβής, Τάση βροχόπτωσης της θέσης μελέτης από ανάλυση της διατριβής και Θέση μελέτης σε σχέση με το μέσο γεωγραφικό πλάτος περιοχής κατανομής του είδους.

**Πίνακας 4.1 :** Έρευνες που μελετήθηκαν στην παρούσα διατριβή και διερευνούν την επίδραση του ατμοσφαιρικού CO<sub>2</sub> στην ανάπτυξη των δέντρων (όπου A σημαίνει αύξηση και όπου M, μη επίδραση του ατμοσφαιρικού CO<sub>2</sub> στην παραγωγικότητα των δασών).

A/A	Αναφορά Δημοσίευσης	Impact factor	Ημερομ.	Αριθμός αναφορών	Τοποθεσία	Μεθοδολογία	Είδος δέντρων/βλάστησης	Λέξη κλειδί	Αποτέλεσμα
1	(Lamarche <i>et al.</i> , 1984)		7/9/1984	416	USA, California		<i>Pinus longaeva</i> +		A
2	(Arnore and Korner, 1995)		1995	84		Greenhouse	<i>Cecropia peltata, Ficus Benjamina, Ctenanthe lubersiana, Elettaria cardamomum, Heliconia humilis, Ficus pumila, Epipremnum pinnatum</i>	Model ecosystem	M
3	(Graybill, 1986)	N/A	1986	54	Semiarid, western USA	Comparisons of growth	<i>Pinus flexilis, Pinus aristata, Pinus longaeva</i>	[dioxido de carbono; anillo de crecimiento; arizona; california; californie; carbon dioxide; cerne; colorado; coniferas]; conifere; conifers; crecimiento; croissance; dioxyde de carbone; growth; growth rings; nevada; soil zonation; utah; zonalite;	A

4	(Kienast and Luxmoore, 1988)	3,13	6/11/1987	50	Switzerland, USA, Cyprus,		<i>Pinus silvestris, Pinus brutia, Pinus nigra, Pinus Ponderosa, Picea abies, Picea pungens, Picea engelmannii, Pseudotsuga menziesii, Abies alba, Cedrus brevifolia</i>	X-ray densitometry CO2 fertilization $\beta$ -factor	M
5	(Hornbeck, Smith and Federer, 1988)		1988	32	USA, New England		<i>Acer rubrum 0Acer saccharum + Betula alleghaniensis +Fagus grandifolia + Fraxinus americana + Picea rubens Picea strobus + Quercus ribra 0 Tsuga canadensis +</i>		A
6	(Becker, 1989a)	1,827	1989	235	France, NE, Vosges mountains		<i>Abies alba</i>		A
7	(Graumlich, 1991)	4,809	$\Phi\epsilon\beta$ -91	232	southern Sierra Nevada.	Comparisons of growth trends Tree-ring sampling sites	<i>subalpine conifer, Pinus balfouriana, Pinus murrayana, Juniperus Occidentalis, No Changes</i>	California; climatic variation; CO2 fertilization; dendrochronology; increasing CO2; Juniperus occidentalis; Pinus balfouriana; Pinus murrayana	M
8	(Bert, 1992)	Thesis	1992	15	France, S, Jura Mountains		<i>Abies alba</i>	Écologie végétale Dendrochronologie Sapin pectiné -- Effets du climat-Sapin	A

9	(West et al., 1993)	1,827	1993	38	USA, Georgia		<i>Pinus palustris</i> +	atmospheric carbon-dioxide liquidambar-styraciflua	A
10	(Graybill and Idso, 1993)	4,65	Map-93	71	Semiarid, high elevations western NA	Comparisons of growth	<i>Pinus aristate</i> + <i>Pinus longaeva</i> +, <i>Pinus balfouriana</i> , <i>Pinus flexilis</i>		A
11	(Becker, Nieminen and Geremia, 1994)	1,441	24/1/1994	40	France, NE +		<i>Quercus petraea</i> <i>Quercus robur</i> + 4% <i>Fagus sylvatica</i>	<i>Quercus robur</i> / <i>Quercus petraea</i> I France / tree growth I dendrochronology I dendroecology / climate I precipitation I temperature I C 20 I global change	A
12	(Nicolussi, Bortenschlager and Körner, 1995)	1,842	18/1/1994	94	Austria, Alps	Direct measurement-Age classes	<i>Pinus cembra</i> -	Alps; Altitude; Carbon dioxide; Climate change; Dendrochronology	M
13	(Picard, 1995)	2,101	18/2/1995	26	France, NE Vosges	(Becker, 1989b) growth trend curve average	<i>Fagus sylvatica</i>	Vosges; années caractéristiques; beech; croissance radiale; dendrochronologie; dendrochronology; dendroecology; dendroécologie; hêtre; pointer years; radial growth	A

14	(Hattenschwiler, Schweingruber and Korner, 1996)	6.173	Δεκ-96	52	Switzerland		<i>Picea abies</i>	Norway spruce, Conifer forest, lignin, nitrogen, tree growth, wood density, Xylem	M
15	(Korner and Arnone, 1992)		1992	563		Greenhouse	<i>Tropical tree species</i>	Model ecosystem	M
16	(Lebourgeois and Becker, 1996)	1,441	1996	8	France, NW, pays de la loire		<i>Pinus nigra</i>	ABIES-ALBA MILL; CLIMATE; FORESTS; MOUNTAINS; PAST VITALITY; Pines nigra; TRENDS; VOSGES; climate; decline; dendrochronology; earlywood; growth trend; latewood; radial growth	A
17	(Knapp and Soulé, 1996)	2,756	1996	50	central Oregon,	laboratory and controlled field experiments	<i>Artemisia tridentata,</i>	CO2 enrichment, central Oregon, sagebrush-steppe, vegetation change.	A
18	(Rathgeber <i>et al.</i> , 1999)	2,101	27/10/1998	32	France, S		<i>Quercus humilis +</i>	global change / CO <sub>2</sub> / productivity / Mediterranean area / <i>Quercus humilis</i>	A
19	(Rolland, Petitcolas and Michalet, 1998)	1,842	4/5/1998	27	France, Alps		<i>Picea abies + Larix decidua + Pinus cembra + Pinus uncinata +</i>	Global change · Timberline · Dendroclimatology · Tree-ring · Conifers&bdy:	A

20	(Briffa <i>et al.</i> , 1998)	2,243	29/1/1998	241	N- Hemisphere Pinus		<i>Pinus+ Picea + Larix +</i>	tree rings, climate change, volcanoes, tree biomass, fertilization	A
21	(Tognetti, Cherubini and Innes, 2000)	7,33	14/12/1999	118	Tuscany, Italy	two-sided t-test to assess if there was a difference between the radial growth at the CO2-enriched site and the control site	<i>Arbutus unedo (strawberry tree), (No-or +)</i>	Arbutus unedo (strawberry tree), Fraxinus ornus, Quercus cerris, Quercus ilex, Quercus pubescens carbon sequestration, dendroecology, Mediterranean trees, natural CO2 springs, Quercus ilex (holm oak), tree rings, water stress.	M
22	(Naidu and Delucia, 1999)	8,502	6/11/1999	28	North Carolina	FACE (Free-Air CO2 Enrichment) system, CO2 treatment	<i>Pinus taeda +</i>	climate change, elevated-CO2, growth, Pinus taeda, understory trees	A
23	(Knapp <i>et al.</i> , 2001)	8,502	21/3/2002	108	Arid Oregon	Detecting trends in residuals	<i>western juniper Juniperus occidentalis +</i>	Atmospheric CO2 enrichment; Climate-growth responses; Western juniper	M
24	(Kergoat <i>et al.</i> , 2002)	3,44	31/12/2002	69	Lab test	Model simulation Studied leaf area index (LAI)	N/A	LAI; CO2; stomatal conductance; global; evapotranspiration	A

25	(Hättenschwiler <i>et al.</i> , 1997)	8,502	30/10/2003	221	Semi-arid, CO2 springs Mediterranean, Italy	Growth comparisons with CO2 data	<i>Quercus ilex</i> +	basal area, dendrochronology, forest regeneration, Mediterranean forests, natural CO2 springs, <i>Quercus ilex</i> , tree ring, water relations	A
26	(Korner, 2005)	N/A	26/8/2005	500	Switzerland	FACE	<i>near-natural deciduous forest 32- to 35-m-tall trees Quercus petraea, Fagus sylvatica, Prunus avium, Carpinus betulus, Tilia platyphylla, Acer campestre</i>	N/A	M
27	(Williams <i>et al.</i> , 1986)		1986	163	Illinois	Greenhouse	<i>Carya ovata, Liriodendron tulipifera, Quercus rubra, Platanus occidentalis, Acer saccharinum, Fraxinus lanceolata,</i>	Model ecosystem	M
28	(Soulé and Knapp, 2006)	7,33	9/5/2006	82	Arid Oregon	Comparisons with drought years	<i>Pinus ponderosa</i> +	CO2 fertilization, ponderosa pine ( <i>Pinus ponderosa</i> ), site harshness, drought, interior Pacific Northwest.	A

29	(Wang <i>et al.</i> , 2006)	8,502	17/1/2006	48	Dry environment, southwestern Manitoba	Comparisons between young trees and old trees +	<i>Picea glauca</i> +	Dendrochronology; Global change; <i>Picea glauca</i> ; Tree ring	A
30	(Voelker <i>et al.</i> , 2006)	8,759	14/3/2006	50	Ozark Mountains in Missouri	Using geographic information system software	<i>Quercus velutina</i> Lam., <i>Quercus coccinea</i> Muench., and <i>Pinus echinata</i> Mill	CO <sub>2</sub> ; <i>Pinus echinata</i> ; <i>Quercus coccinea</i> ; <i>Quercus velutina</i> ; carbon dioxide; climate change; dendrochronology; red oak; segment length curse; shortleaf pine	A
31	(von Felten <i>et al.</i> , 2007)	1,842	11/1/2007	48	Switzerland	FACE	<i>alpine treeline Larix decidua</i> L. and <i>Pinus uncinata</i> Ramond over	Elevated CO <sub>2</sub> _ <i>Larix decidua</i> _ <i>Pinus uncinata</i>	A
32	(Koutavas, 2008)	2,107	14/6/2007	31	island of Kefhalonia in the Ionian Sea	Measurements of cores were conducted from 11 living and one dead firs at four sites	<i>Abies cephalonica</i> or <i>greek fir</i>	CO <sub>2</sub> fertilization; Cephalonia Island; Tree rings; Greek fir; <i>Abies cephalonica</i>	A
33	(Gaucherel, Guiot and Misson, 2008)	4,25	4/11/2008	28	Mediterranean region of France PACA	Modeled species (MAIDEN),	<i>Pinus halepensis</i> and <i>Quercus Ilex</i>	N/A	A

34	(Martínez-Vilalta <i>et al.</i> , 2008)	8,02	30/5/2008	160	Spain NE, Catalonia, North East		<i>Pinus Sylvestris</i>	Basal area increment (BAI); CO2 fertilization; Climate change; Climate-growth responses; Dendroecology; Drought; <i>Pinus sylvestris</i> (Scots pine); Tree growth; Tree rings; Water availability	A
35	(Vila <i>et al.</i> , 2008)	2,101	7/3/2008	20	France, SE		<i>Pinus sylvestris</i> -/+ <i>Pinus halepensis</i> +	global change bioclimatic limit radial growth <i>Pinus halepensis</i> <i>Pinus sylvestris</i>	M
36	(Norby, <i>et al.</i> , 1992)		1992	383		Greenhouse	<i>Liriodendron tulipifera</i>	Model ecosystem	M
37	(Tissue, Thomas and Strain, 1997)	6,173	28/6/2008	122	glasshouses in the Duke University Durham USA	laboratory and controlled field experiments	<i>Loblolly pine seeds (Pinus taeda L.)</i>	allometric growth analysis; elevated atmospheric carbon dioxide; loblolly pine; nitrogen; photosynthesis; seasonal responses; stomatal conductance; TNC.	A
38	(Gaucherel, Guiot and Misson, 2008)	3,7	8/2/2008	4	Mediterranean region of France	Using the process-based model (MAIDEN)	<i>Pinus Halepensis and Quercus Ilex</i>		A

39	(Cole et al., 2010)		22/10/2009	44	USA, Wisconsin		<i>Populus tremuloides</i> +	CO2 fertilization; Climate change; Heterozygosity-fitness correlation; Northern hardwood forests; Tree-rings	A
40	(Rozendaal et al., 2010)	7,33	3/12/2009	34	South Bolivia Los Indios, La Chonta and Purísima		<i>Cedrela odorata</i> (Spanish cedar) + <i>Cedrelinga catenaeformis</i> _ <i>Clarisia racemosa</i> + <i>Peltogyne heterophylla</i> + <i>Pseudolmedia laevis</i> +	Bolivia; Climate change; Historical growth increase; Long-term tree growth; Tree ring analysis; Tropical forest	A
41	(Gedalof and Berg, 2010)	4,65	2010	53	Globally	annual radial tree growth, International Tree ring Data Bank (ITRDB)		Global change, Forests, CO2 fertilization	A
42	(Zuidema, Vlam and Chien, 2011)	1,842	Φεβ-11	21	Vietnam		<i>Annamocarya sinensis</i> - <i>Calocedrus macrolepis</i> <i>Dacrydium elatum</i> -, <i>Pinus kwangtungensis</i> -/+	Autocorrelated growth; Dendroecology; Juvenile selection effect; Threatened species; Tree age; Vietnam	A
43	(Girardin et al., 2011)	3,44	4/2/2011	31	Provincial Forest in Manitoba, Canada	model is used to simulate high-frequency responses to climate variability TGI	<i>Pinus banksiana</i>	N/A	M

44	(Koutavas, 2013)	8,502	20/9/2012	26	Kefalonia Greece	['], 021	<i>Abies cephalonica or greek fir</i>	Ainos, Cephalonia, CO2 fertilization, drought, Greece, Greek fir, growth-climate relationships, <i>Abies cephalonica</i> , Mediterranean, water-use efficiency	A
45	(Tegel <i>et al.</i> , 2014)	2,017	27/9/2013	71	Albania and Macedonia	Comparisons of growth	<i>Fagus sylvatica</i>	Albania Balkan Peninsula, <i>Fagus sylvatica</i> L., Macedonia, Tree-ring width,	A
46	(Bader <i>et al.</i> , 2013)		3/4/2013	52	Swiss Canopy Crane (SCC)	FACE	<i>Fagus sylvatica</i> , <i>Quercus petraea</i> , <i>Carpinus betulus</i> , <i>Tilia platyphyllos</i> , <i>Acer campestre</i> and one <i>Prunus avium</i>	CO2 fertilization, coupled climate-carbon cycle model, ecosystem carbon cycling, elevated CO2, free-air CO2 enrichment (FACE), global carbon cycle	M
47	(Waterhouse <i>et al.</i> , 2004)	4,571	13/6/2013	122	northern Europe: northwest Norfolk, south Bedfordshire southwest Finland	calculate values of intrinsic water-use efficiency (IWUE) and intercellular CO2 concentrations	<i>pedunculate oak (Quercus robur L.)</i> , <i>common, beech (Fagus sylvatica L.)</i> and <i>Scots pine (Pinus sylvestris L.)</i> . +	Atmosphere; Carbon dioxide; Carbon isotope ratios; <i>Fagus sylvatica</i> ; Intrinsic water-use efficiency; <i>Pinus sylvestris</i> ; <i>Quercus robur</i> ; Trees	A

48	(Warrier <i>et al.</i> , 2013)	0,774	24/7/2013	4	Lab test: Institute of Forest Genetics and Tree Breeding (IFGTB), Coimbatore, Tamil Nadu, India	laboratory and controlled field experiments	<i>Casuarina equisetifolia</i> , <i>Ailanthus excelsa</i> and <i>Tectona grandis</i>	Plantation; Elevated CO <sub>2</sub> ; Tropical trees; India; Carbonic anhydrase	A
49	(Boucher <i>et al.</i> , 2014)	3,7	27/4/2014	19	Fontainebleau Forest (France)	MAIDENiso ecophysiological model	Forest trees +	N/A	A
50	(Li <i>et al.</i> , 2014)	2,23	4/12//2014	25	Changbai Mountains In northeastern China	light-use efficiency model	<i>Pinus koraiensis</i> +, - no changes	N/A	M
51	(Camarero, Gazol, Galván, <i>et al.</i> , 2015)	8,502	31/10/2014	27	Pyrenees		<i>Pinus uncinata</i>	Basal area increment; Climate warming; Dendroecology; Generalized additive mixed models; <i>Pinus uncinata</i> ; Subalpine forests	M
52	(Camarero, Gazol, Tardif, <i>et al.</i> , 2015)	4.248	1/9/2015	24	Iberian Range, Spain, Aragon,	Field sampling & Measurements	<i>Pinus sylvestris</i> +, <i>Pinus nigra</i> -, <i>Pinus Pinaster</i> -, <i>Pinus uncinata</i> -, <i>Pinus halepensis</i>	basal area increment, CO <sub>2</sub> -fertilization effect, dendroecology, drought, Generalized Additive Models, Mediterranean pines, <i>Pinus</i> , Spain, water balance.	M

53	(Li, Harrison and Prentice, 2016)	2,363	23/3/2015	3	Great Western Woodlands, Western Australia	Tree-Growth simulation comparisons with CO2 data	<i>gymnosperm Callitris columellaris</i>	CO2 fertilisation; Carbon allocation; Response to climate change; Tree growth modelling; Tree rings; Water-use efficiency	A
54	(Battipaglia <i>et al.</i> , 2015)	2,806	25/3/2015	14	Central Africa	Measurements of cross sections for individual trees	<i>Entandrophragma cylindricum Sprague</i> (commonly known as Sapele), <i>Triplochiton scleroxylon K. Schum. (Ayou)</i> , <i>Erythrophloeum ivorense A.Chev. (Tali)</i> .	Trees, Carbon dioxide, Dendrology, Root growth, Rain Carbon sequestration, Climate change	M
55	(Badeau <i>et al.</i> , 1996)		1996	66	France, NE and S		<i>Picea abies</i>	Tree Ring Radial Growth Ring Width Fagus Sylvatica Growth Trend	A

Μέσα από την βιβλιογραφική ανασκόπηση έχουν εντοπιστεί 55 έρευνες σύμφωνα με τα κριτήρια που είχαν χρησιμοποιηθεί, με ημερολογιακό εύρος από το 1984 μέχρι το 2015. Από τις 55 εργασίες 37 έδειξαν ότι η άνοδος των ατμοσφαιρικών εκπομπών CO<sub>2</sub> έχει θετική επίδραση στην αύξηση των δέντρων ενώ 18 μελέτες μη μεταβολή της παραγωγικότητας των δασών .

Στον πίνακα 4.2. γίνεται ταξινόμηση των εργασιών ως προς τα δεδομένα των αριθμών αναφορών και των αποτελεσμάτων. Με τη βοήθεια της ταξινόμησης έγινε υπολογισμός της μέσης τιμής του αριθμού των εργασιών προς τον αριθμό των αναφορών με βάση τα δεδομένα των αποτελεσμάτων που φαίνεται στον πίνακα 4.3.

**Πίνακας 4.2.** Ταξινόμηση των εργασιών κατά τα αποτελέσματα και τον αριθμό αναφορών (όπου Α σημαίνει αύξηση και όπου Μ, μη επίδραση του ατμοσφαιρικού CO<sub>2</sub> στην παραγωγικότητα των δασών) .

A/A	Αναφορά Δημοσίευσης	Αριθμός αναφορών	Αποτέλεσμα
1	(Lamarche <i>et al.</i> , 1984)	416	A
20	(Briffa <i>et al.</i> , 1998)	241	A
6	(Becker, 1989a)	235	A
25	(Hättenschwiler <i>et al.</i> , 1997)	221	A
34	(Martínez-Vilalta <i>et al.</i> , 2008)	160	A
37	(Tissue, Thomas and Strain, 1997)	122	A
47	(Waterhouse <i>et al.</i> , 2004)	122	A
28	(Soulé and Knapp, 2006)	82	A
10	(Graybill and Idso, 1993)	71	A
45	(Tegel <i>et al.</i> , 2014)	71	A
24	(Kergoat <i>et al.</i> , 2002)	69	A
55	(Badeau <i>et al.</i> , 1996)	66	A
3	(Graybill, 1986)	54	A
41	(Gedalof and Berg, 2010)	53	A
17	(Knapp and Soulé, 1996)	50	A
30	(Voelker <i>et al.</i> , 2006)	50	A
29	(Wang <i>et al.</i> , 2006)	48	A
31	(von Felten <i>et al.</i> , 2007)	48	A
39	(Cole <i>et al.</i> , 2010)	44	A
11	(Becker, Nieminen and Geremia, 1994)	40	A
9	(West <i>et al.</i> , 1993)	38	A
40	(Rozendaal <i>et al.</i> , 2010)	34	A
5	(Hornbeck, Smith and Federer, 1988)	32	A

18	(Rathgeber <i>et al.</i> , 1999)	32	A
32	(Koutavas, 2008)	31	A
22	(Naidu and Delucia, 1999)	28	A
33	(Gaucherel, Guiot and Misson, 2008)	28	A
19	(Rolland, Petitcolas and Michalet, 1998)	27	A
13	(Picard, 1995)	26	A
44	(Koutavas, 2013)	26	A
42	(Zuidema, Vlam and Chien, 2011)	21	A
49	(Boucher <i>et al.</i> , 2014)	19	A
8	(Bert, 1992)	15	A
16	(Lebourgeois and Becker, 1996)	8	A
38	(Gaucherel, Guiot and Misson, 2008)	4	A
48	(Warrier <i>et al.</i> , 2013)	4	A
53	(Li, Harrison and Prentice, 2016)	3	A
15	(Korner and Arnore, 1992)	563	M
26	(Korner, 2005)	500	M
36	(Norby, et al., 1992)	383	M
7	(Graumlich, 1991)	232	M
27	(Williams et al., 1986)	163	M
21	(Tognetti, Cherubini and Innes, 2000)	118	M
23	(Knapp <i>et al.</i> , 2001)	108	M
12	(Nicolussi, Bortenschlager and Körner, 1995)	94	M
2	(Arnore and Korner, 1995)	84	M
14	(Hattenschwiler, Schweingruber and Korner, 1996)	52	M
46	(Bader <i>et al.</i> , 2013)	52	M
4	(Kienast and Luxmoore, 1988)	50	M
43	(Girardin <i>et al.</i> , 2011)	31	M
51	(Camarero, Gazol, Galván, <i>et al.</i> , 2015)	27	M
50	(Li <i>et al.</i> , 2014)	25	M
52	(Camarero, Gazol, Tardif, <i>et al.</i> , 2015)	24	M
35	(Vila <i>et al.</i> , 2008)	20	M
54	(Battipaglia <i>et al.</i> , 2015)	14	M

**Πίνακας 4.3.** Αναλογία των εργασιών σε σχέση με τα αποτελέσματα και τον αριθμό αναφορών.

Αποτελέσματα	Αριθμός Εργασιών	Αριθμός Αναφορών	Μέση τιμή	Ποσοστό επί του συνόλου των εργασιών	Ποσοστό επί του συνόλου των αναφορών
Αύξηση	37	2540	68,64	67,27%	50%
Μη μεταβολή	18	2639	146,611	32,72%	50%
Σύνολο	55	5278			

Από τον υπολογισμό αυτό διαφαίνεται ότι οι εργασίες που δεν δείχνουν επηρεασμό της αύξησης του ατμοσφαιρικού CO<sub>2</sub> με την παραγωγικότητα των δασών έχουν πολύ μεγαλύτερο αριθμό αναφορών σε αντιστοιχία ανά μονάδα σε σχέση με τις υπόλοιπες εργασίες. Επιπλέον οι εργασίες με αποτέλεσμα μη μεταβολή ενώ είναι το 32% του συνόλου των εργασιών έχουν μεγαλύτερο αριθμό αναφορών.

Από τις εργασίες που μελετήθηκαν έγινε επιλογή αυτών στις οποίες έγινε έρευνα στο πεδίο. Από τις 55 εργασίες οι 41 επιλέγηκαν για περαιτέρω ανάλυση. Στους πίνακες 4.4. και 4.5. έγινε η ίδια ταξινόμηση και ανάλυση όπως πιο πάνω.

**Πίνακας 4.4.** Ταξινόμηση των εργασιών πεδίου κατά τα αποτελέσματα και τον αριθμό αναφορών (όπου A σημαίνει αύξηση και όπου M, μη επίδραση του ατμοσφαιρικού CO<sub>2</sub> στην παραγωγικότητα των δασών).

A/A	Αναφορά Δημοσίευσης	Αριθμός αναφορών	Αποτέλεσμα
1	(Lamarche <i>et al.</i> , 1984)	416	<b>A</b>
5	(Becker, 1989a)	235	<b>A</b>
20	(Hättenschwiler <i>et al.</i> , 1997)	221	<b>A</b>
27	(Martínez-Vilalta <i>et al.</i> , 2008)	160	<b>A</b>
36	(Waterhouse <i>et al.</i> , 2004)	122	<b>A</b>
19	(Knapp <i>et al.</i> , 2001)	108	<b>A</b>
22	(Soulé and Knapp, 2006)	82	<b>A</b>
9	(Graybill and Idso, 1993)	71	<b>A</b>
34	(Tegel <i>et al.</i> , 2014)	71	<b>A</b>
2	(Graybill, 1986)	54	<b>A</b>
14	(Knapp and Soulé, 1996)	50	<b>A</b>
24	(Voelker <i>et al.</i> , 2006)	50	<b>A</b>
23	(Wang <i>et al.</i> , 2006)	48	<b>A</b>
25	(von Felten <i>et al.</i> , 2007)	48	<b>A</b>
29	(Cole <i>et al.</i> , 2010)	44	<b>A</b>
10	(Becker, Nieminen and Geremia, 1994)	40	<b>A</b>
8	(West <i>et al.</i> , 1993)	38	<b>A</b>
30	(Rozendaal <i>et al.</i> , 2010)	34	<b>A</b>
4	(Hornbeck, Smith and Federer, 1988)	32	<b>A</b>
15	(Rathgeber <i>et al.</i> , 1999)	32	<b>A</b>
26	(Koutavas, 2008)	31	<b>A</b>
18	(Naidu and Delucia, 1999)	28	<b>A</b>

16	(Rolland, Petitcolas and Michalet, 1998)	27	<b>A</b>
12	(Picard, 1995)	26	<b>A</b>
33	(Koutavas, 2013)	26	<b>A</b>
31	(Zuidema, Vlam and Chien, 2011)	21	<b>A</b>
7	(Bert, 1992)	15	<b>A</b>
13	(Lebourgeois and Becker, 1996)	8	<b>A</b>
40	(Li, Harrison and Prentice, 2016)	3	<b>A</b>
21	(Korner, 2005)	500	<b>M</b>
6	(Graumlich, 1991)	232	<b>M</b>
17	(Tognetti, Cherubini and Innes, 2000)	118	<b>M</b>
11	(Nicolussi, Bortenschlager and Körner, 1995)	94	<b>M</b>
35	(Bader <i>et al.</i> , 2013)	52	<b>M</b>
3	(Kienast and Luxmoore, 1988)	50	<b>M</b>
32	(Girardin <i>et al.</i> , 2011)	31	<b>M</b>
38	(Camarero, Gazol, Galván, <i>et al.</i> , 2015)	27	<b>M</b>
37	(Li <i>et al.</i> , 2014)	25	<b>M</b>
39	(Camarero, Gazol, Tardif, <i>et al.</i> , 2015)	24	<b>M</b>
28	(Vila <i>et al.</i> , 2008)	20	<b>M</b>
41	(Battipaglia <i>et al.</i> , 2015)	14	<b>M</b>

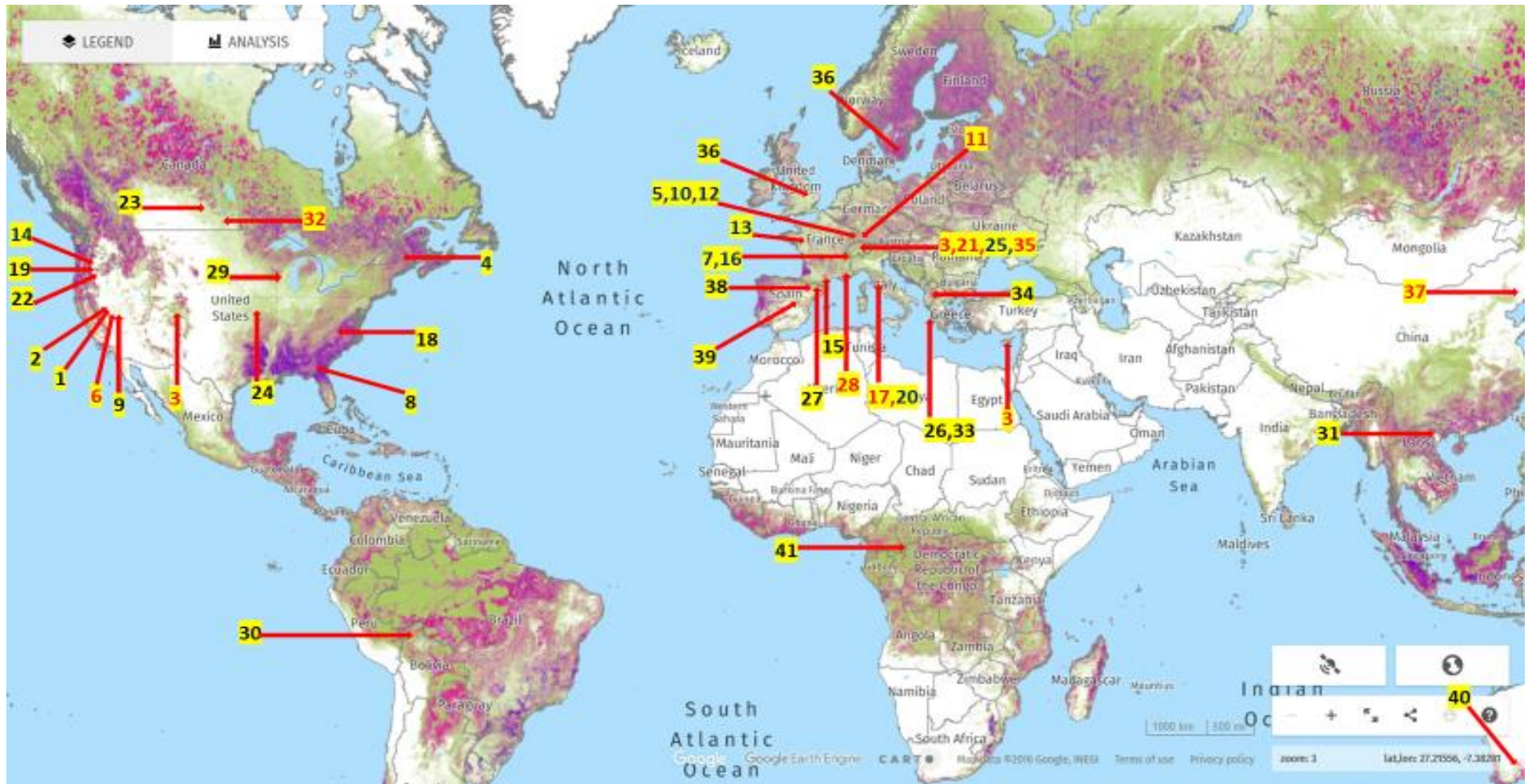
**Πίνακας 4.5.** Αναλογία των εργασιών σε σχέση με τα αποτελέσματα και τον αριθμό αναφορών.

Αποτελέσματα	Αριθμός Εργασιών	Αριθμός Αναφορών	Μέση τιμή	Ποσοστό επί του συνόλου των εργασιών	Ποσοστό επί του συνόλου των αναφορών
Αύξηση	29	2141	73,82	70,73%	64,33%
Μη μεταβολή	12	1187	98,91	29,26%	35,66%
Σύνολο	41	3328			

Από τις 41 εργασίες πεδίου οι 29 καταλήγουν σε συμπέρασμα θετικής επίδρασης του ατμοσφαιρικού CO<sub>2</sub> στην παραγωγικότητα των δασών και οι 12 σε μη μεταβολή της. Οι εργασίες που καταλήγουν σε συμπέρασμα μη μεταβολής ενώ κατέχουν μικρό ποσοστό επί του συνόλου των εργασιών εντούτοις εξακολουθούν να έχουν μεγαλύτερο αριθμό αναφορών σε αντιστοιχία ανά μονάδα σε σχέση με τις υπόλοιπες εργασίες

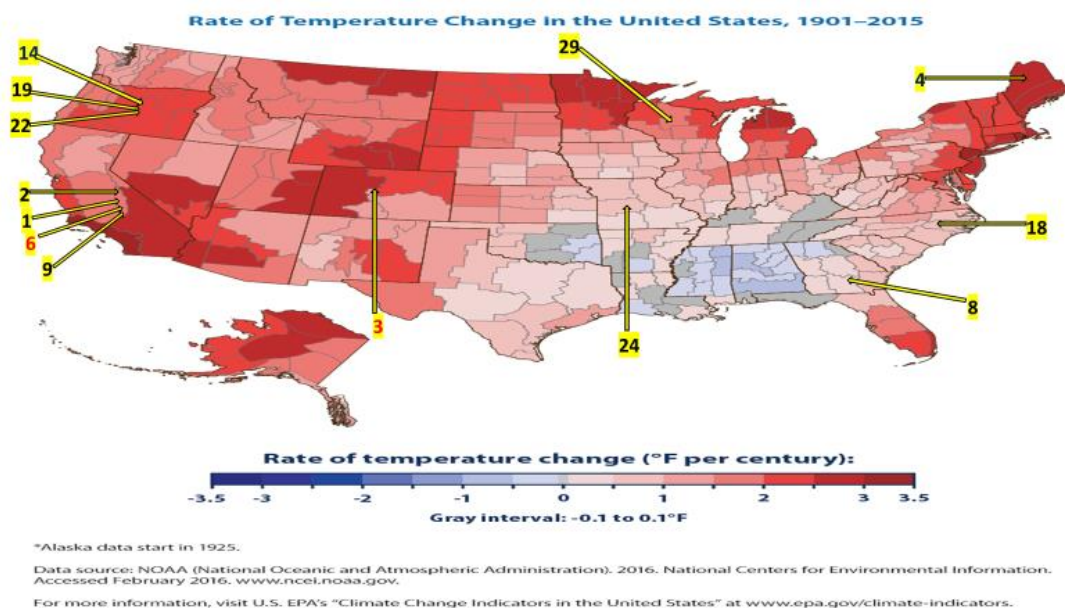
Έγινε κατανομή και παράθεση των 41 εργασιών πεδίου με βάση τις πληροφορίες που δίνονται στο δείκτη τοποθεσία και τον αύξων αριθμό στον πίνακα 4.7., σε παγκόσμιο

χάρτη που φαίνεται στην εικόνα 4.1. Φαίνεται ότι στη γεωγραφική κατανομή των εργασιών με βάση το δείκτη της τοποθεσίας μελέτης παρουσιάζεται ιδιαίτερη πυκνότητα στην περιοχή της κεντρικής Ευρώπης και μετά ακολουθεί η περιοχή της κεντρικής Αμερικής. Αρκετά πιο λίγες εργασίες έχουν ευρεθεί στην περιοχή του Ισημερινού καθώς και στο βόρειο και νότιο ημισφαίριο.

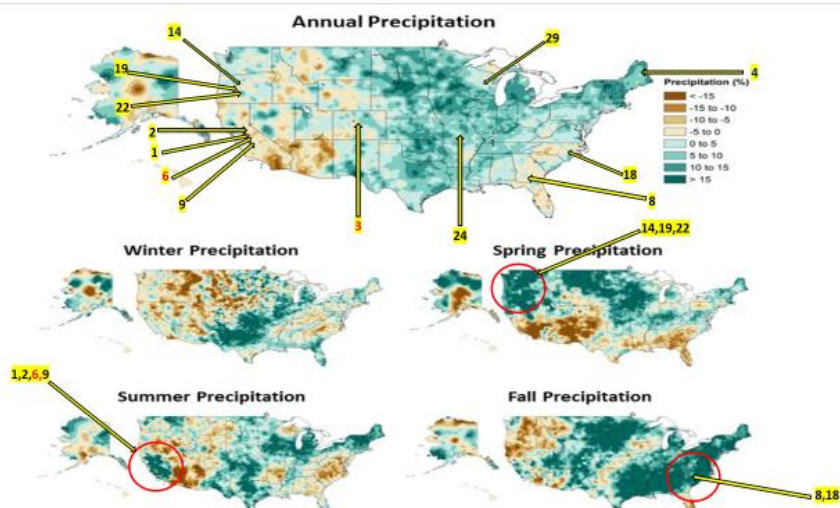


**Εικόνα 4.1:** Η γεωγραφική κατανομή των εργασιών κατά αύξων αριθμό του πίνακα 4.7. Με μαύρο οι εργασίες που έδειξαν θετικό αποτέλεσμα και με κόκκινο οι εργασίες που έδειξαν μη μεταβολή. Παγκόσμιος χάρτης δασικής κάλυψης, πράσινο χρώμα δασική κάλυψη, μωβ χρώμα απώλεια δασών. (GLOBAL FOREST WATCH, 2018).

Για κάθε εργασία έγινε διερεύνηση της θέσης μελέτης δηλαδή κατά πόσον δίνονται δεδομένα συντεταγμένων και υψομέτρου. Διερευνήθηκαν οι τάσεις της θερμοκρασίας και των κατακρημνίσεων στις θέσεις μελέτης που φαίνονται στις εικόνες 4.2 μέχρι 4.11. Στις εικόνες φαίνονται οι θέσεις μελέτης με μαύρο οι εργασίες που έδειξαν θετικό αποτέλεσμα και με κόκκινο οι εργασίες που έδειξαν μη μεταβολή.

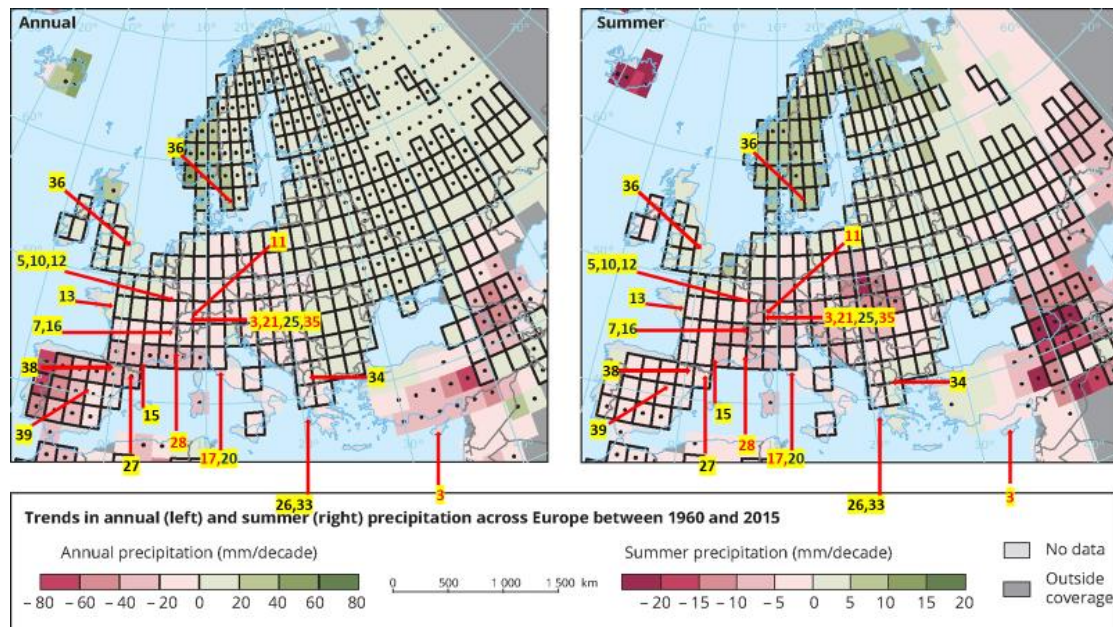


**Εικόνα 4.2:** Τάση θερμοκρασίας στην περιοχή των Ηνωμένων Πολιτειών την περίοδο 1901 - 2015 στις Η.Π.Α (NOAA,2016), με μαύρο οι εργασίες που έδειξαν θετικό αποτέλεσμα και με κόκκινο οι εργασίες που έδειξαν μη μεταβολή.

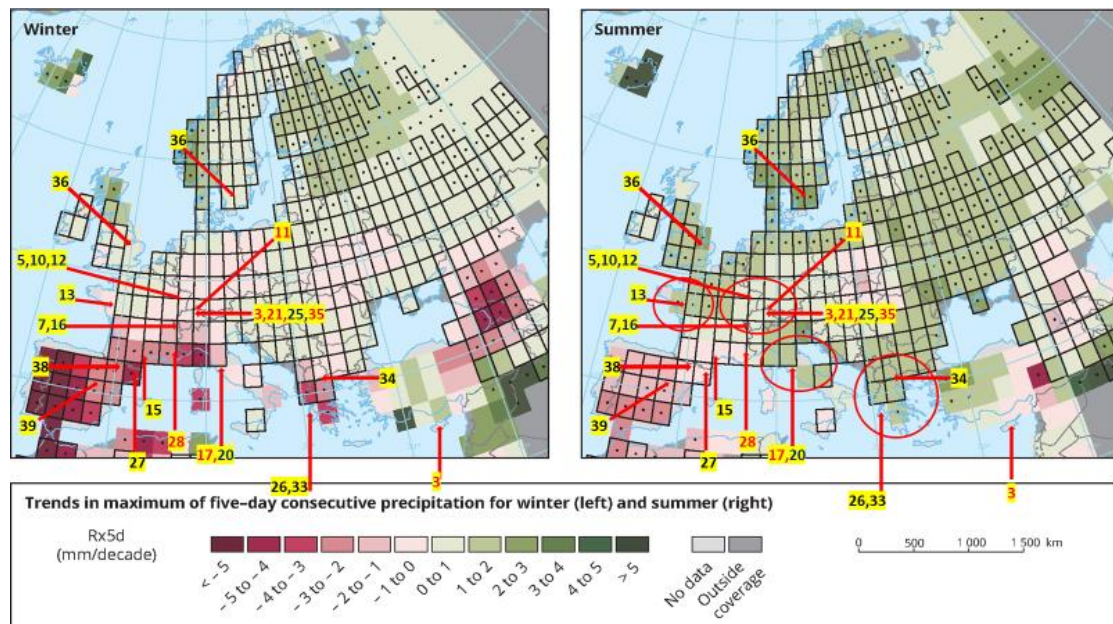


**Figure 7.1:** Annual and seasonal changes in precipitation over the United States. Changes are the average for present-day (1986–2015) minus the average for the first half of the last century (1901–1960 for the contiguous United States, 1925–1960 for Alaska and Hawai'i) divided by the average for the first half of the century. (Figure source: [top panel] adapted from Peterson et al. 2013,<sup>76</sup> © American Meteorological Society. Used with permission; [bottom four panels] NOAA NCEI, data source: nCLIMDiv).

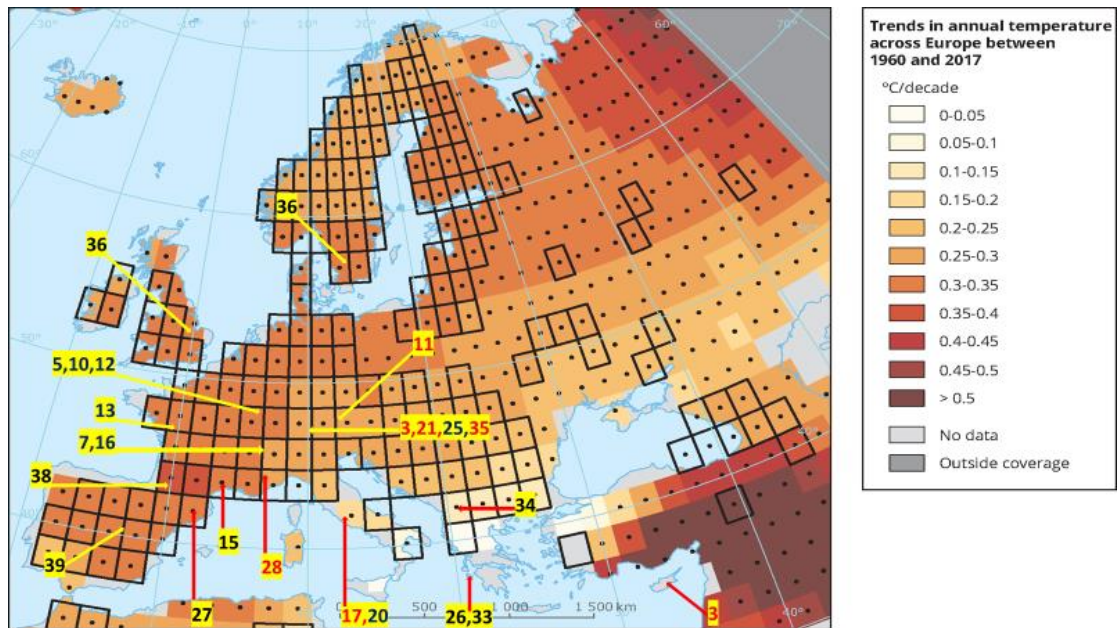
**Εικόνα 4.3:** Τάση κατακρημνίσεων στην περιοχή των Ηνωμένων Πολιτειών (Peterson, et al., 2013 cited in Easterling et al., 2017). Στους κύκλους τονίζεται η εποχική διαφοροποίηση των κατακρημνίσεων στις θέσεις μελέτης. Με μαύρο οι εργασίες που έδειξαν θετικό αποτέλεσμα και με κόκκινο οι εργασίες που έδειξαν μη μεταβολή.



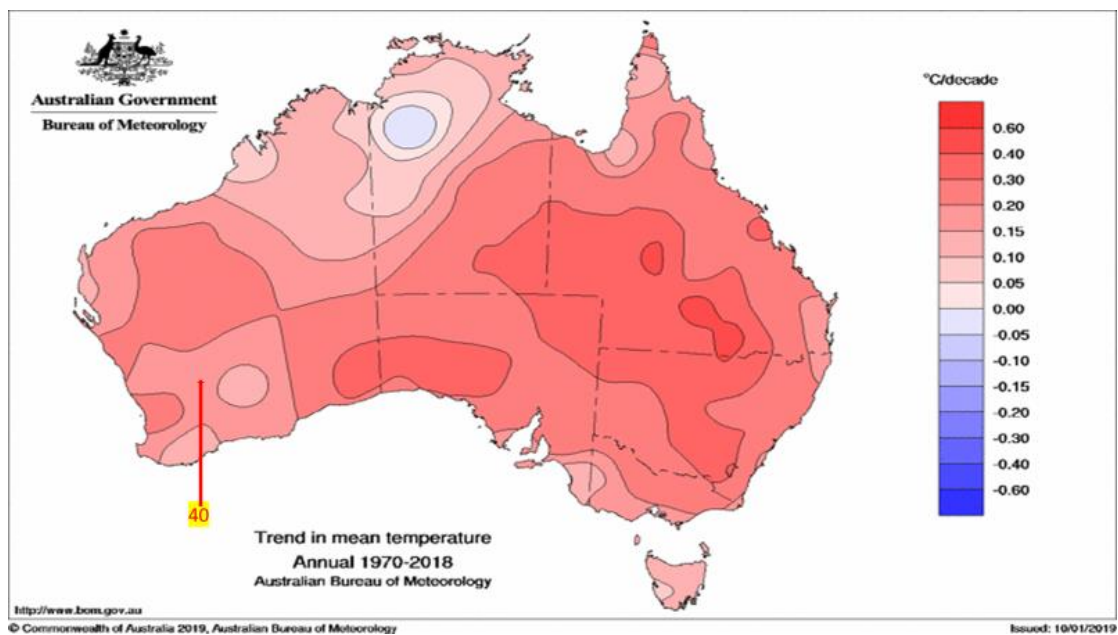
**Εικόνα 4.4.:** Τάσεις των ετήσιων κατακρημνίσεων στην Ευρώπη 1960 – 2017 και το καλοκαίρι (EEA, 2018b). Με μαύρο οι εργασίες που έδειξαν θετικό αποτέλεσμα και με κόκκινο οι εργασίες που έδειξαν μη μεταβολή.



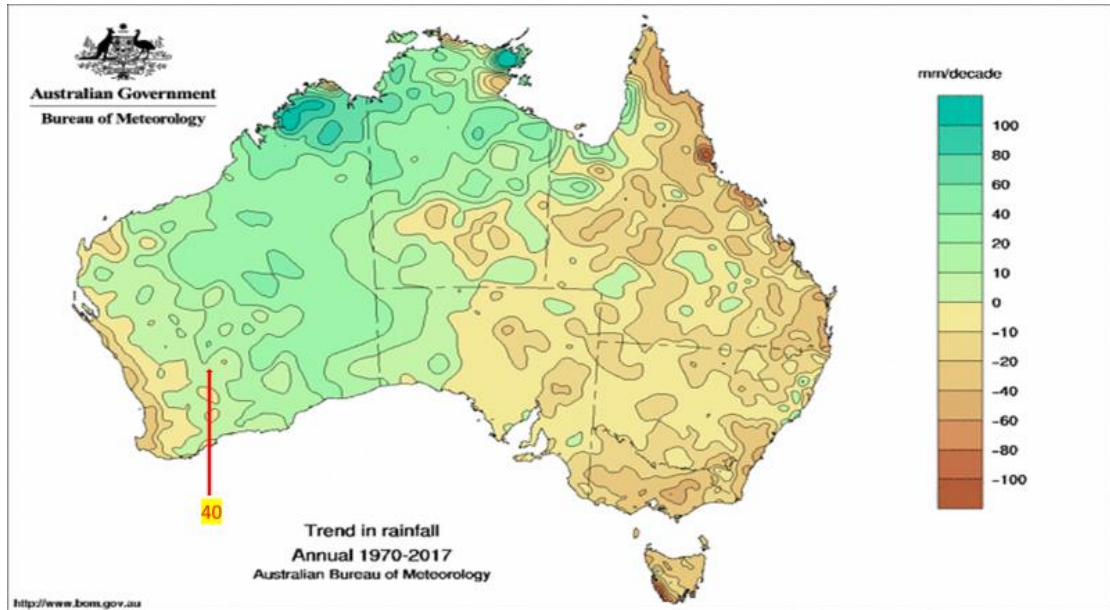
**Εικόνα 4.5.:** Τάσεις εποχικών συνεχών έντονων κατακρημνίσεων στην Ευρώπη 1960 – 2017 το καλοκαίρι και το χειμώνα (EEA, 2018c). Στους κύκλους τονίζεται η εποχική διαφοροποίηση των κατακρημνίσεων στις θέσεις μελέτης. Με μαύρο οι εργασίες που έδειξαν θετικό αποτέλεσμα και με κόκκινο οι εργασίες που έδειξαν μη μεταβολή.



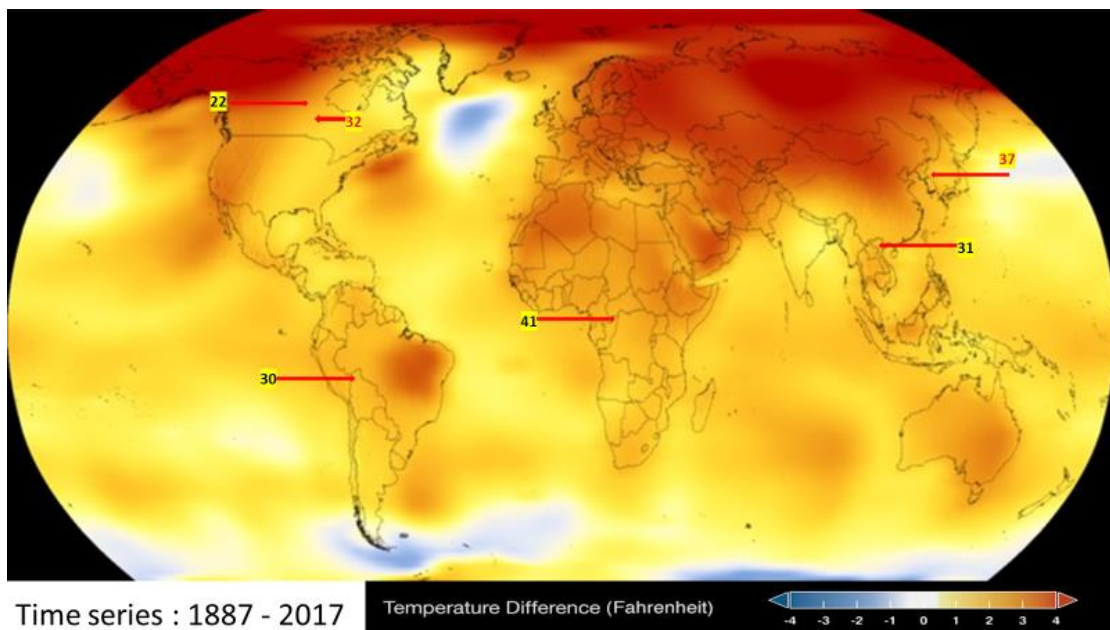
**Εικόνα 4.6:** Τάσεις της ετήσιας θερμοκρασίας στην Ευρώπη 1960 – 2017 (EEA, 2018a). Με μαύρο οι εργασίες που έδειξαν θετικό αποτέλεσμα και με κόκκινο οι εργασίες που έδειξαν μη μεταβολή.



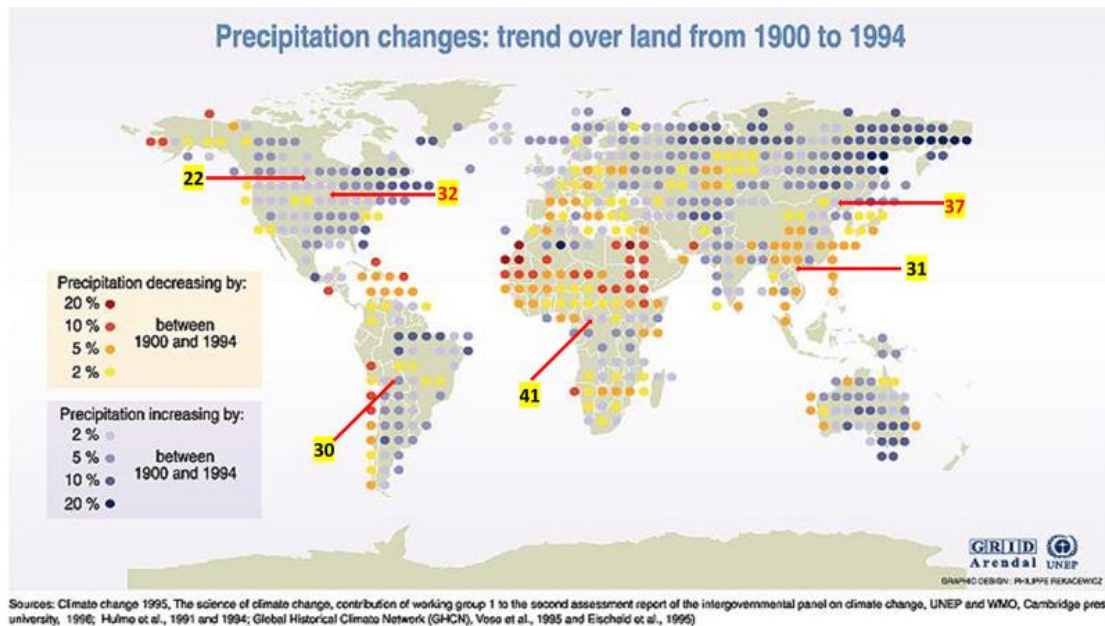
**Εικόνα 4.7:** Τάσεις της ετήσιας θερμοκρασίας στην Αυστραλία 1970 – 2018 (Australia Government, Bureau of Meteorology, 2019).



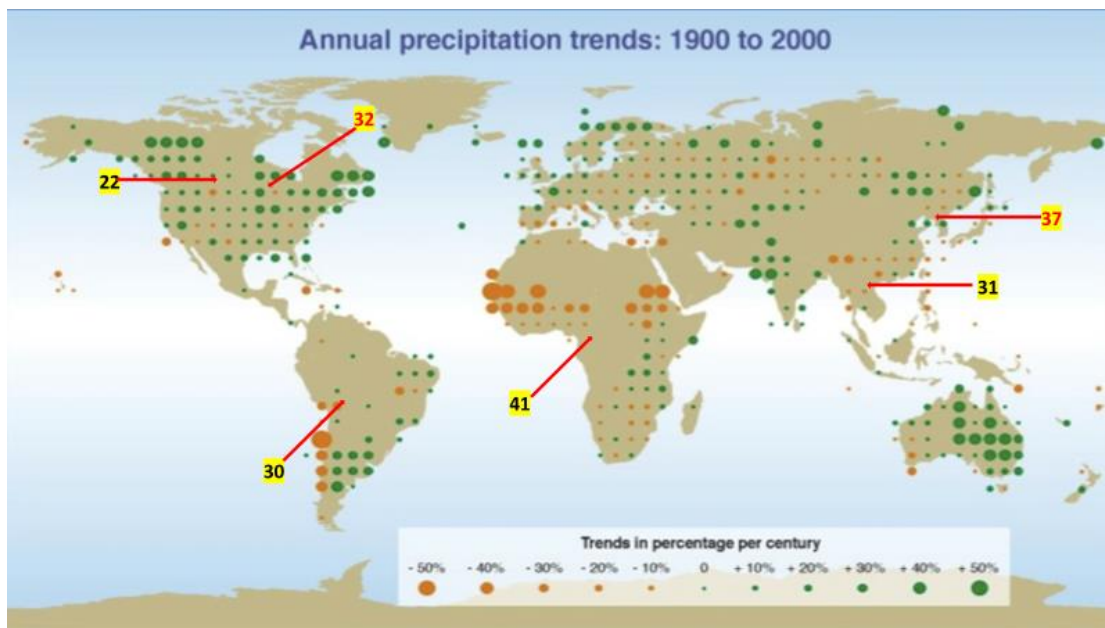
© Commonwealth of Australia 2018, Australian Bureau of Meteorology Issued: 20/02/2018  
**Εικόνα 4.8:** Τάσεις των ετήσιων κατακρημνίσεων στην Αυστραλία 1970 – 2018 (Australia Government, Bureau of Meteorology, 2019).



Time series : 1887 - 2017  
**Εικόνα 4.9:** Τάσεις της ετήσιας θερμοκρασίας παγκοσμίως 1887 – 2017 (NASA/GISS, 2018). Με μαύρο οι εργασίες που έδειξαν θετικό αποτέλεσμα και με κόκκινο οι εργασίες που έδειξαν μη μεταβολή.



**Εικόνα 4.10:** Τάσεις των ετήσιων κατακρημνίσεων παγκοσμίως 1900 – 1994 (UNEP, 1995). Με μαύρο οι εργασίες που έδειξαν θετικό αποτέλεσμα και με κόκκινο οι εργασίες που έδειξαν μη μεταβολή.



**Εικόνα 4.11:** Τάσεις των ετήσιων κατακρημνίσεων παγκοσμίως 1900 – 2000 (IPCC, 2001). Με μαύρο οι εργασίες που έδειξαν θετικό αποτέλεσμα και με κόκκινο οι εργασίες που έδειξαν μη μεταβολή.

Για να καταστεί δυνατό να ευρεθεί η σχέση της θέσης μελέτης με το μέσο γεωγραφικό πλάτος της περιοχής κατανομής του είδους καταγράφηκαν τα είδη που μελετήθηκαν στις εργασίες που φαίνονται στον πίνακα 4.6. Στο σύνολο των εργασιών έχουν μελετηθεί 64 είδη σε 99 θέσεις μελέτης εκ των οποίων οι 61

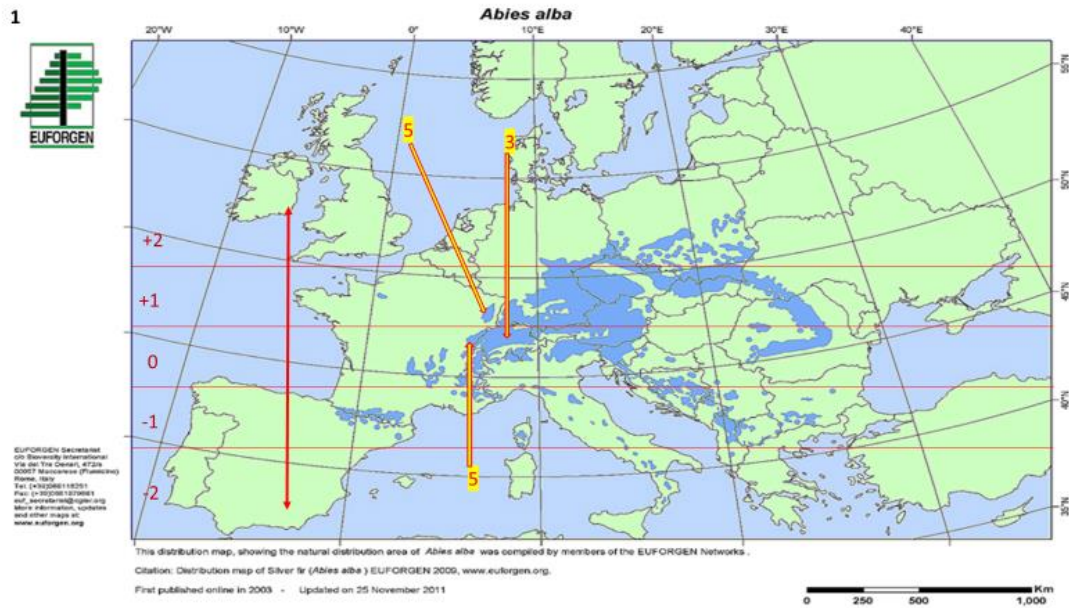
έχουν δείξει θετική επίδραση της αύξησης της συγκέντρωσης του ατμοσφαιρικού CO<sub>2</sub> στην παραγωγικότητα των δέντρων και 38 μη μεταβολή.

**Πίνακας 4.6.** Είδη που μελετήθηκαν στις εργασίες πεδίου (όπου Α σημαίνει αύξηση και όπου Μ, μη επίδραση του ατμοσφαιρικού CO<sub>2</sub> στην παραγωγικότητα των δασών).

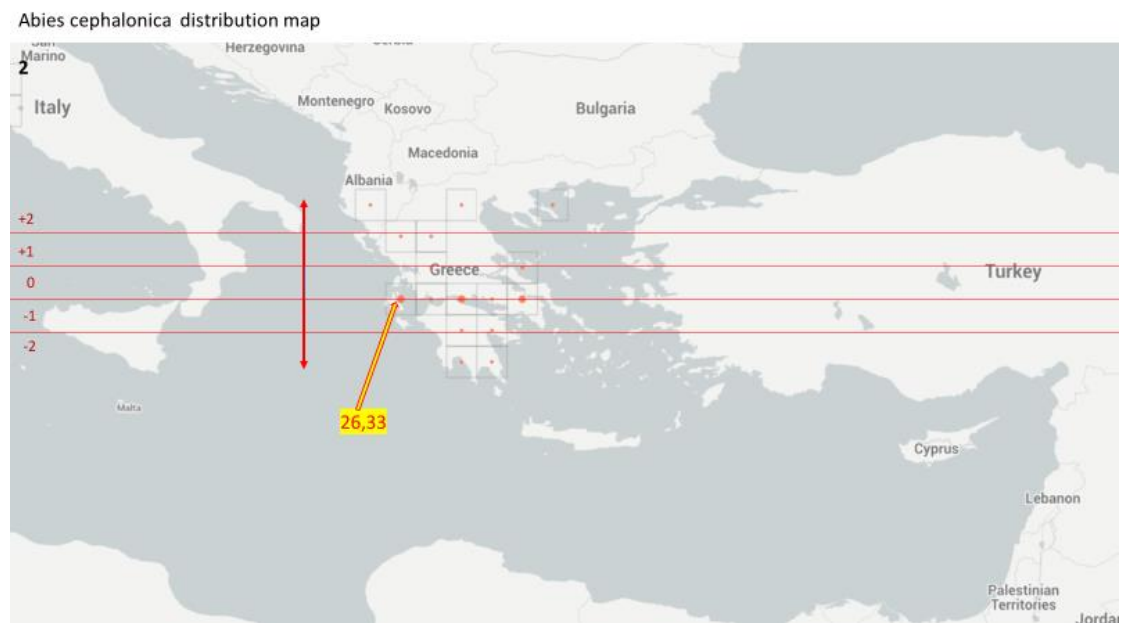
	Είδος δέντρων/βλάστησης	Α/Α Αριθμός Εργασίας στον πίνακα 4.7.	Συχνότητα μελέτης	Α	Μ
1	<i>Abies alba</i>	3,5,7	3	2	1
2	<i>Abies cephalonica greek fir</i>	26,33	2	2	
3	<i>Acer campestre</i>	35,21	2		2
4	<i>Acer rubrum</i>	4	1	1	
5	<i>Acer saccharum</i>	4	1	1	
6	<i>Annamocarya sinensis</i>	31	1	1	
7	<i>Arbutus unedo</i>	17	1		1
8	<i>Artemisia tridentata</i>	14	1	1	
9	<i>Betula alleghaniensis</i>	4	1	1	
10	<i>Callitris columellaris</i>	40	1	1	
11	<i>Calocedrus macrolepis</i>	31	1	1	
12	<i>Carpinus betulus</i>	35,21	2		2
13	<i>Cedrela odorata</i>	30	1	1	
14	<i>Cedrelinga catenaeformis</i>	30	1	1	
15	<i>Cedrus brevifolia</i>	3	1		1
16	<i>Clarisia racemosa</i>	30	1	1	
17	<i>Dacrydium elatum</i>	31	1	1	
18	<i>Entandrophragma cylindricum Sprague</i>	41	1		1
19	<i>Erythrophloeum ivorense A.Chev.</i>	41	1		1
20	<i>Fagus grandifolia</i>	4	1	1	
21	<i>Fagus sylvatica</i>	10,21,35,12,34,36	6	4	2
22	<i>Fraxinus americana</i>	4	1	1	
23	<i>Juniperus Occidentalis</i>	6,19	2	1	1
24	<i>Larix decidua</i>	25,16	2	2	
25	<i>Peltogyne heterophylla</i>	30	1	1	
26	<i>Picea abies</i>	3,16	2	1	1
27	<i>Picea engelmannii</i>	3	1		1
28	<i>Picea glauca</i>	23	1	1	
29	<i>Picea pungens</i>	3	1		1
30	<i>Picea rubens</i>	4	1	1	
31	<i>Pinus aristata</i>	2,9	2	2	
32	<i>Pinus balfouriana</i>	6,9	2	1	1
33	<i>Pinus banksiana</i>	32	1		1
34	<i>Pinus brutia</i>	3	1		1
35	<i>Pinus cembra</i>	11,16	2	1	1
36	<i>Pinus echinata Mill</i>	24	1	1	

37	<i>Pinus flexilis</i>	2,9	2	2	
38	<i>Pinus halepensis</i>	28,39	2	1	1
39	<i>Pinus koraiensis</i>	37	1	1	
40	<i>Pinus kwangtungensis</i>	31	1	1	
41	<i>Pinus longaeva</i>	1,2,9	3	3	
42	<i>Pinus murayana</i>	6	1		1
43	<i>Pinus nigra</i>	3,13,39	3	1	2
44	<i>Pinus palustris</i>	8	1	1	
45	<i>Pinus pinaster</i>	39	1		1
46	<i>Pinus ponderosa</i>	22,3	2	1	1
47	<i>Pinus strobus</i>	4	1	1	1
48	<i>Pinus sylvestris</i>	3,27,28,36,39	5	2	3
49	<i>Pinus taeda</i>	18	1	1	
50	<i>Pinus uncinata</i>	16,38,25,39	4	2	2
51	<i>Populus tremuloides</i>	29	1	1	
52	<i>Prunus avium</i>	21,35	2		2
53	<i>Pseudolmedia laevis</i>	30	1	1	
54	<i>Pseudotsuga menzesii</i>	3	1		
55	<i>Quercus coccinea</i> Muench	24	1	1	
56	<i>Quercus humilis</i>	15	1	1	
57	<i>Quercus petraea</i>	21,35,10	3	1	2
58	<i>Quercus robur</i>	10,36	2	2	
59	<i>Quercus rubra</i>	4	1	1	
60	<i>Quercus ilex</i>	20	1	1	
61	<i>Quercus velutina</i>	24	1	1	
62	<i>Tilia platyphyllos</i>	21,35	2		2
63	<i>Triplochiton</i> <i>scleroxylon</i> K. Schum.	41	1		1
64	<i>Tsuga canadensis</i>	4	1	1	

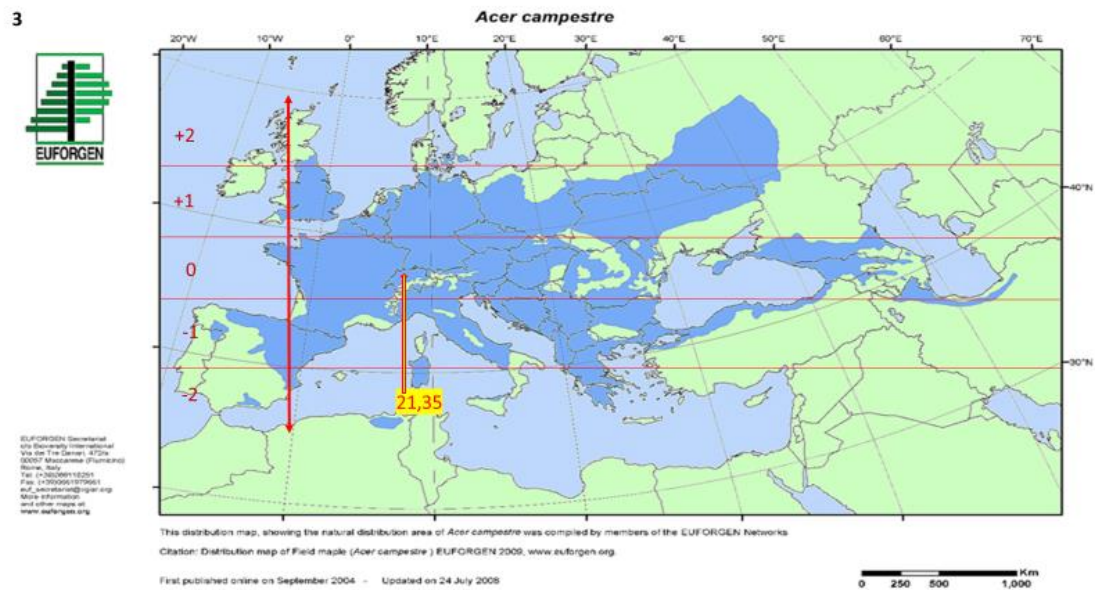
Για κάθε είδος έγινε διερεύνηση της γεωγραφικής εξάπλωσης του και κατάταξη της της θέσης μελέτης με το μέσο γεωγραφικό πλάτος της περιοχής κατανομής του σύμφωνα με την κλίμακα που περιγράφεται στο κεφάλαιο 3. Στις εικόνες 4.12 μέχρι 4.75 φαίνεται η εργασία που έγινε για τη συσχέτιση της θέσης μελέτης με τη γεωγραφική κατανομή του είδους. Στις εικόνες φαίνεται η γεωγραφική κατανομή, η κλίμακα καθώς και οι θέσεις μελέτης των εργασιών που έχουν μελετήσει το συγκεκριμένο είδος βλάστησης. Οι εικόνες είναι τοποθετημένες με αλφαβητική σειρά και αρίθμηση όπως και στον πίνακα 4.6.



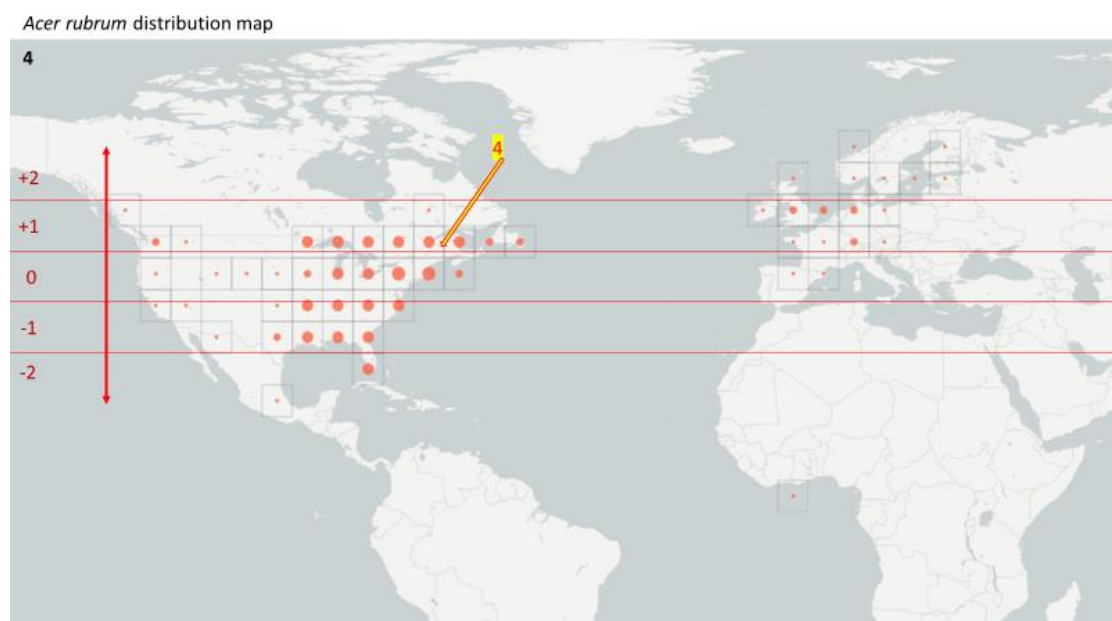
**Εικόνα 4.12.** Γεωγραφική κατανομή του είδους *Abies alba* (EUFORGEN, 2019).



**Εικόνα 4.13.** Γεωγραφική κατανομή του είδους *Abies cephalonica* (Global Biodiversity Information Facility, 2019).

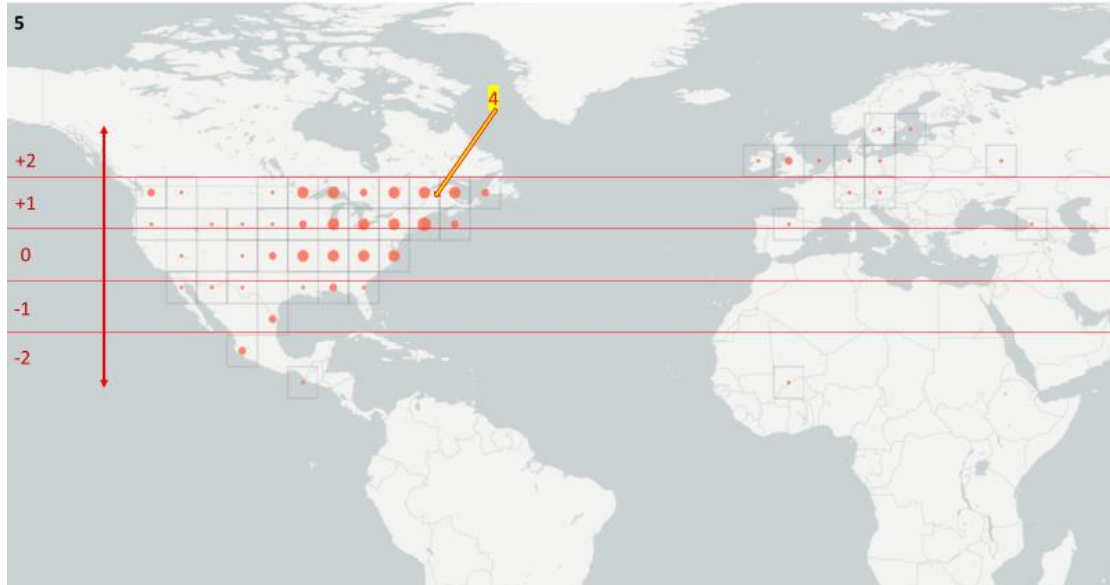


**Εικόνα 4.14.** Γεωγραφική κατανομή του είδους *Acer campestre* (EUFORGEN, 2019).



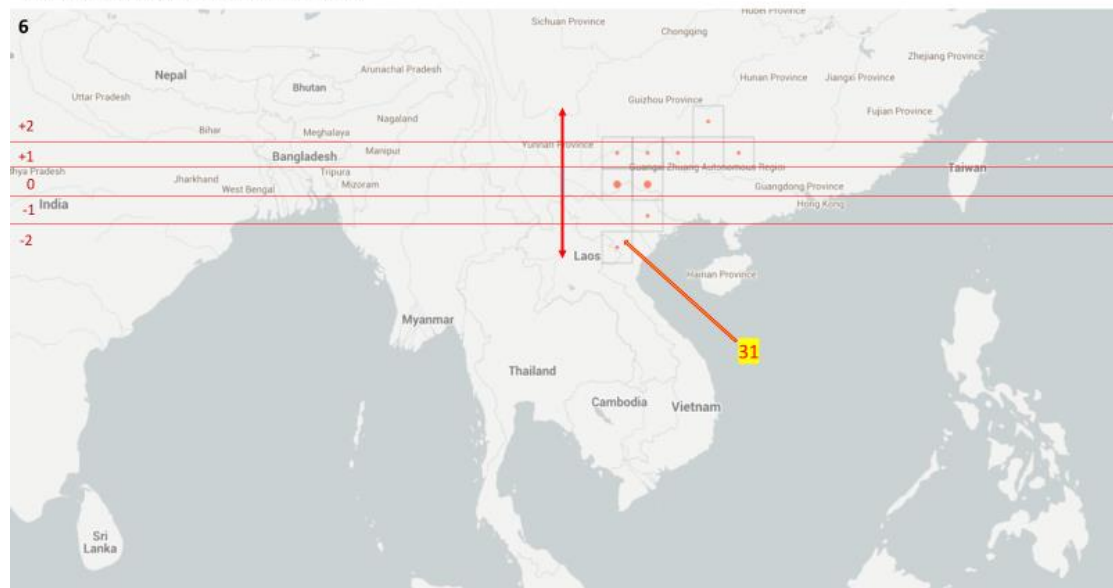
**Εικόνα 4.15.** Γεωγραφική κατανομή του είδους *Acer rubrum* (Global Biodiversity Information Facility, 2019).

*Acer saccharum* distribution map



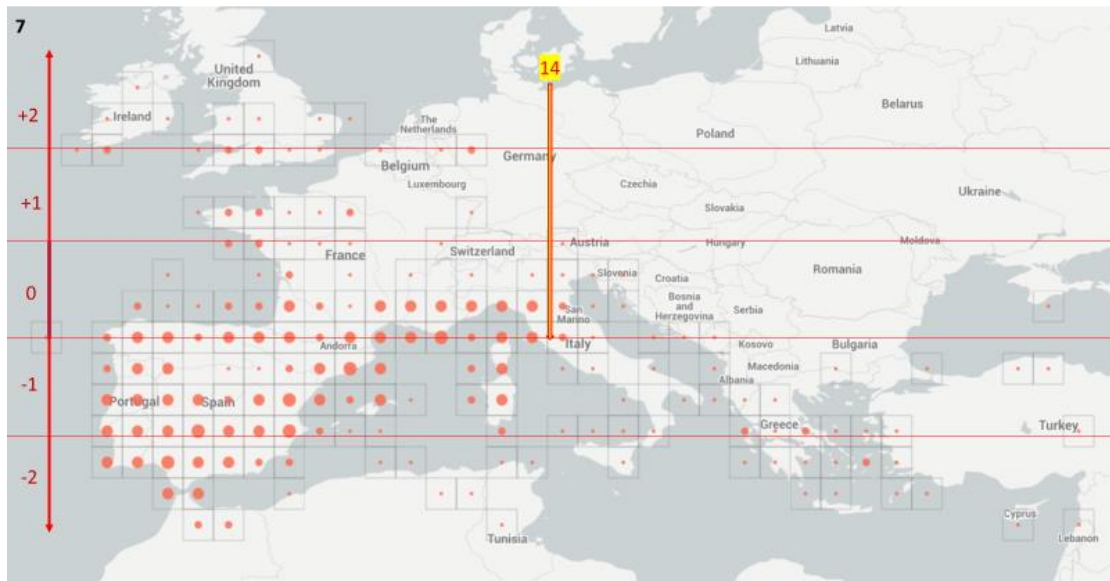
**Εικόνα 4.16.** Γεωγραφική κατανομή του είδους *Acer saccharum* (Global Biodiversity Information Facility, 2019).

*Annamocarya sinensis* distribution map



**Εικόνα 4.17.** Γεωγραφική κατανομή του είδους *Annamocarya sinensis* (Global Biodiversity Information Facility, 2019).

*Arbutus unedo* distribution map



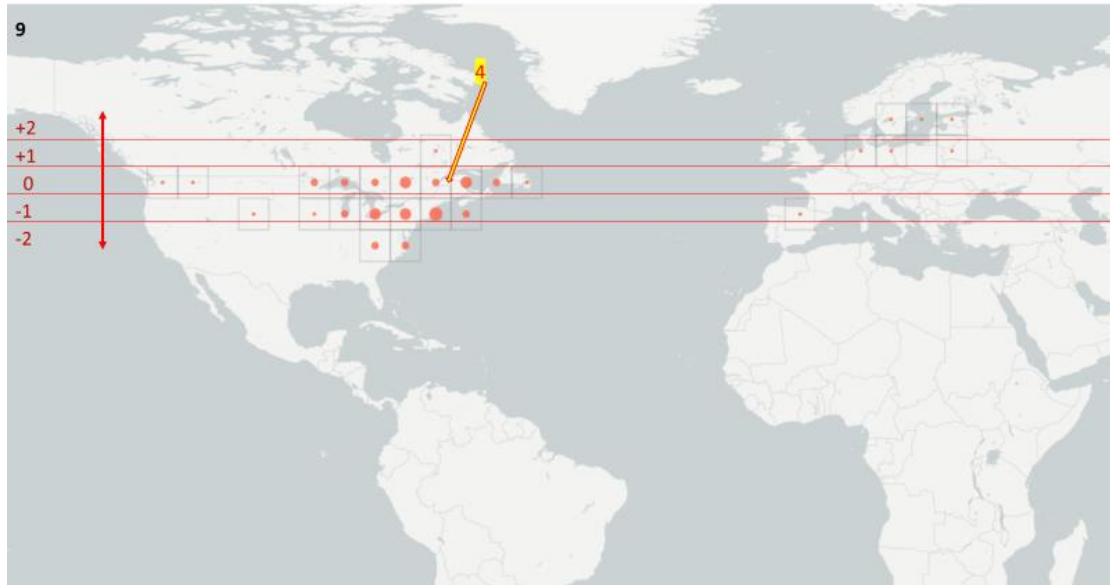
**Εικόνα 4.18.** Γεωγραφική κατανομή του είδους *Arbutus unedo* (Global Biodiversity Information Facility, 2019).

*Artemisia tridentata* distribution map



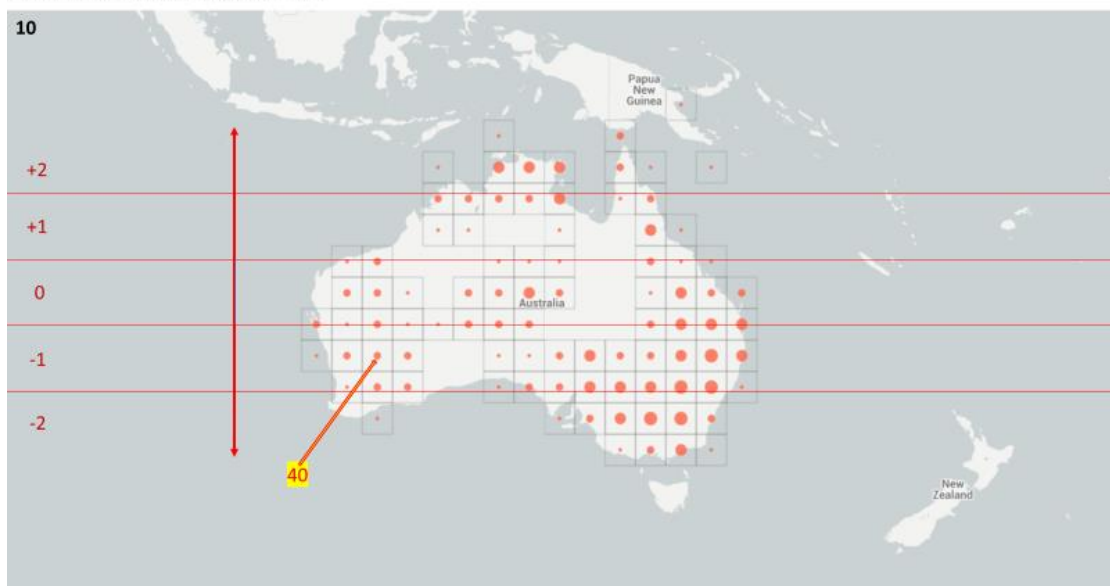
**Εικόνα 4.19.** Γεωγραφική κατανομή του είδους *Artemisia tridentata* (Global Biodiversity Information Facility, 2019).

*Betula alleghaniensis* distribution map



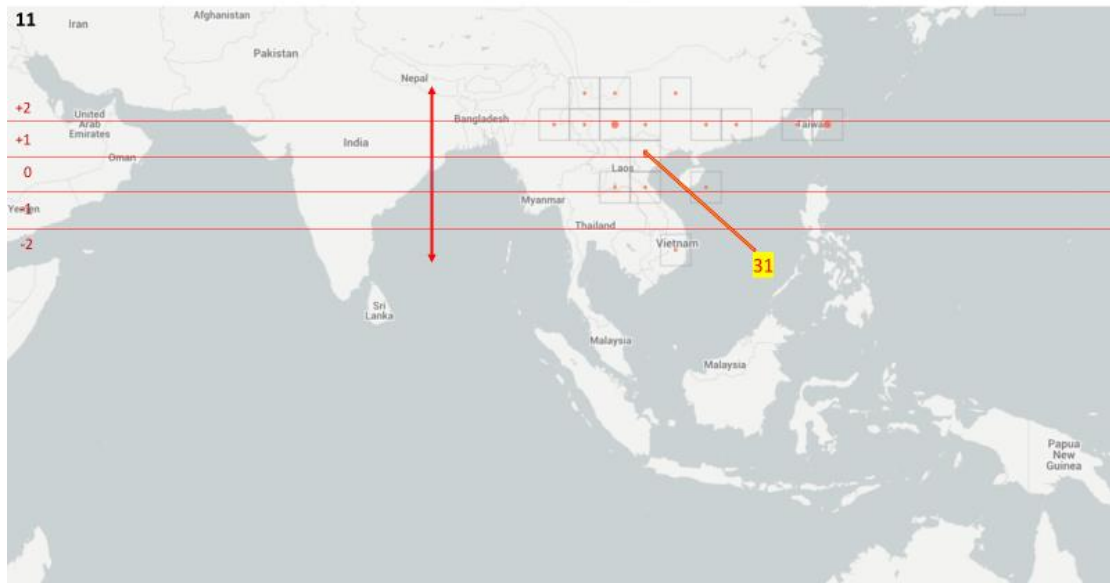
**Εικόνα 4.20.** Γεωγραφική κατανομή του είδους *Betula alleghaniensis* (Global Biodiversity Information Facility, 2019).

*Callitris columellaris* distribution map



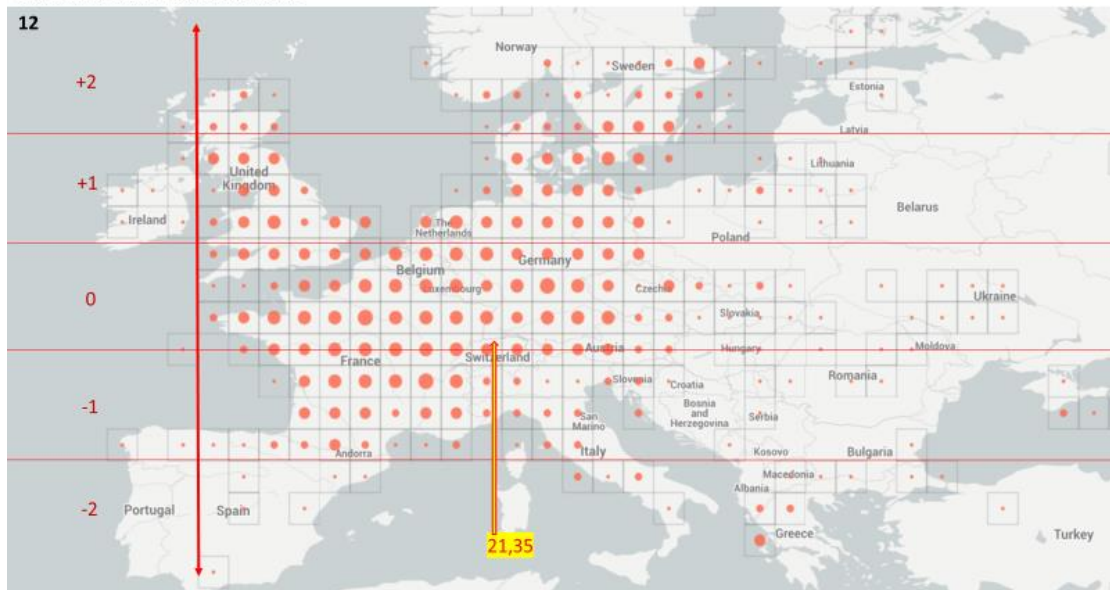
**Εικόνα 4.21.** Γεωγραφική κατανομή του είδους *Callitris columellaris* (Global Biodiversity Information Facility, 2019).

*Calocedrus macrolepis* distribution map



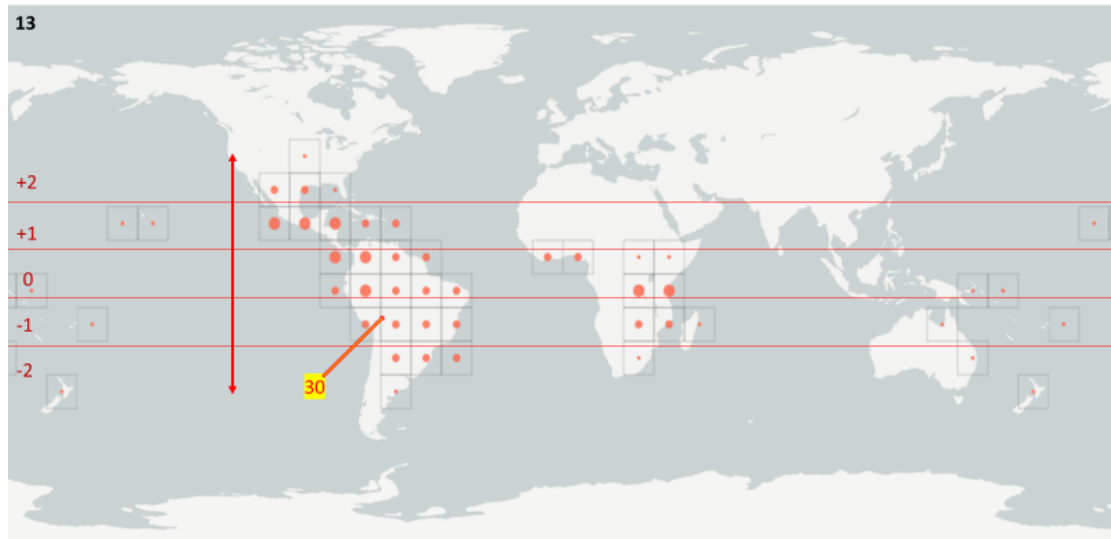
**Εικόνα 4.22.** Γεωγραφική κατανομή του είδους *Calocedrus macrolepis* (Global Biodiversity Information Facility, 2019).

*Carpinus betulus* distribution map



**Εικόνα 4.23.** Γεωγραφική κατανομή του είδους *Carpinus betulus* (Global Biodiversity Information Facility, 2019).

*Cedrela odorata* distribution map



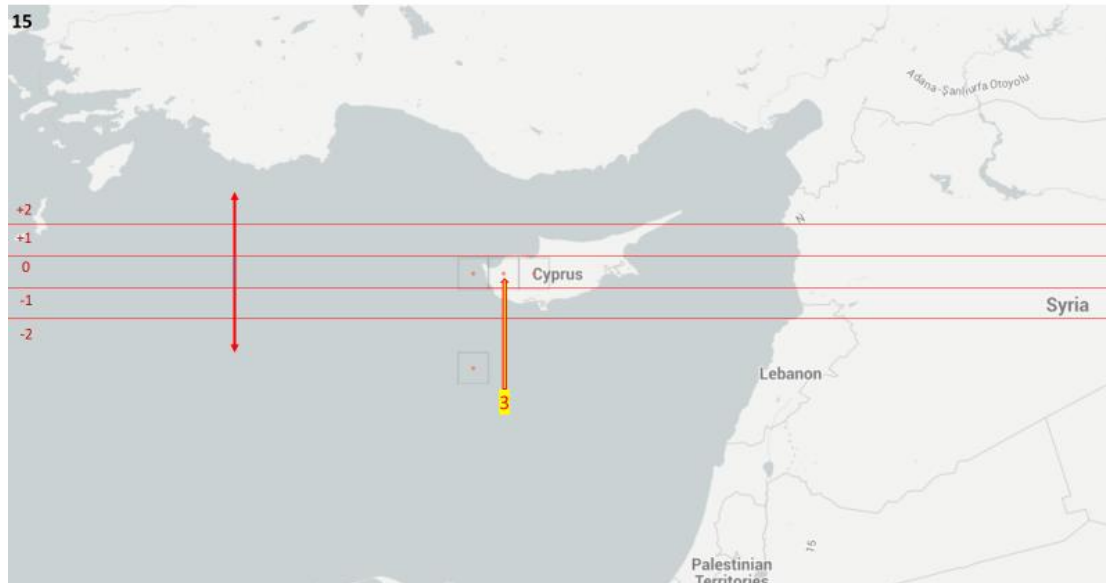
**Εικόνα 4.24.** Γεωγραφική κατανομή του είδους *Cedrela odorata* (Global Biodiversity Information Facility, 2019).

*Cedrelinga catenaeformis* distribution map



**Εικόνα 4.25.** Γεωγραφική κατανομή του είδους *Cedrelinga catenaeformis* (Global Biodiversity Information Facility, 2019).

*Cedrus brevifolia* distribution map



**Εικόνα 4.26.** Γεωγραφική κατανομή του είδους *Cedrus brevifolia* (Global Biodiversity Information Facility, 2019).

*Clarisia racemosa* distribution map



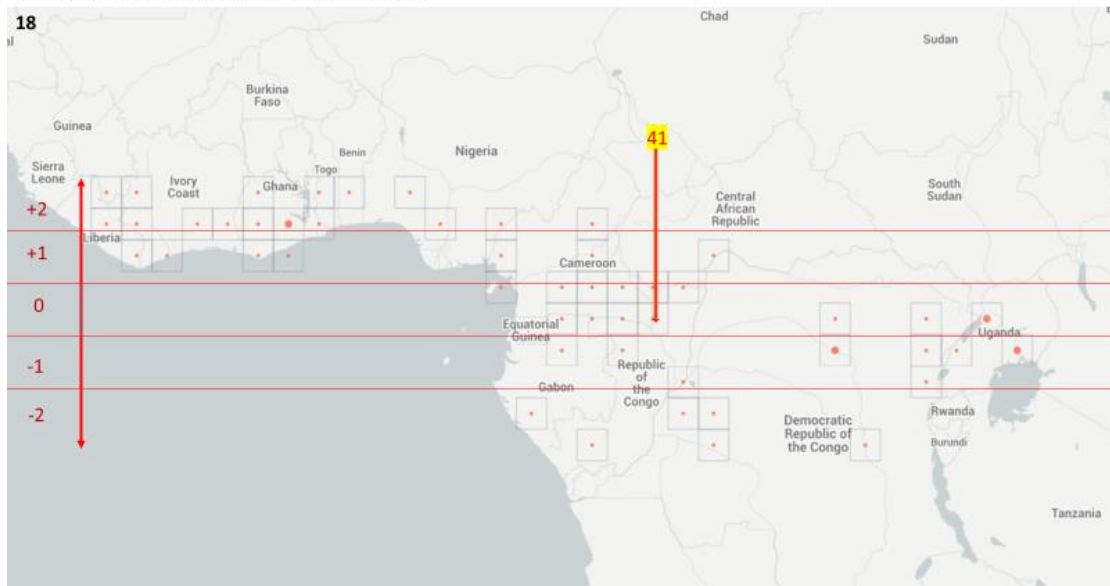
**Εικόνα 4.27.** Γεωγραφική κατανομή του είδους *Clarisia racemosa* (Global Biodiversity Information Facility, 2019).

*Dacrydium elatum* distribution map



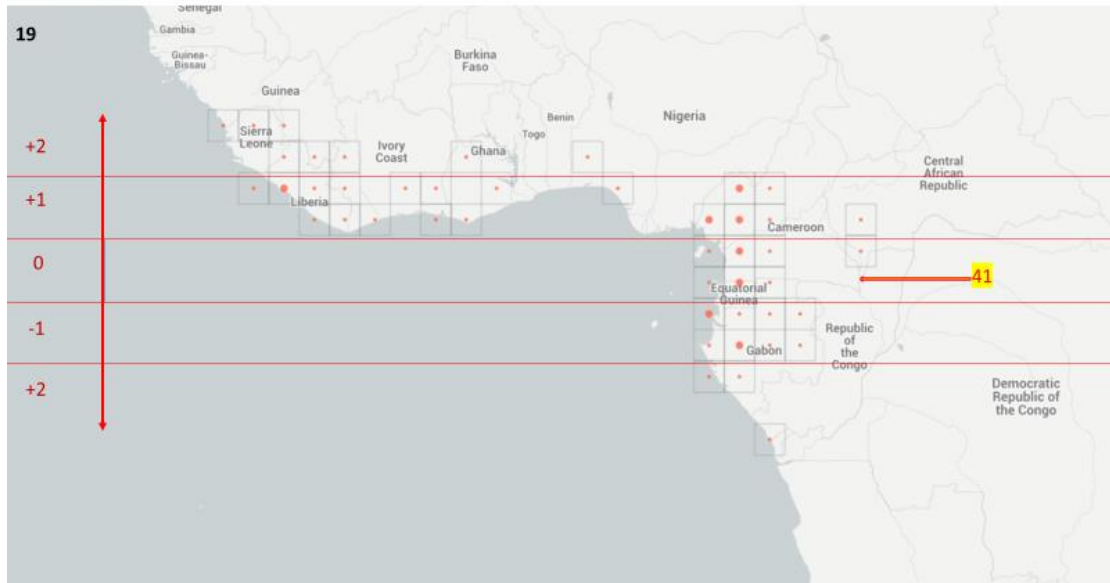
**Εικόνα 4.28.** Γεωγραφική κατανομή του είδους *Dacrydium elatum* (Global Biodiversity Information Facility, 2019).

*Entandrophragma cylindricum* distribution map



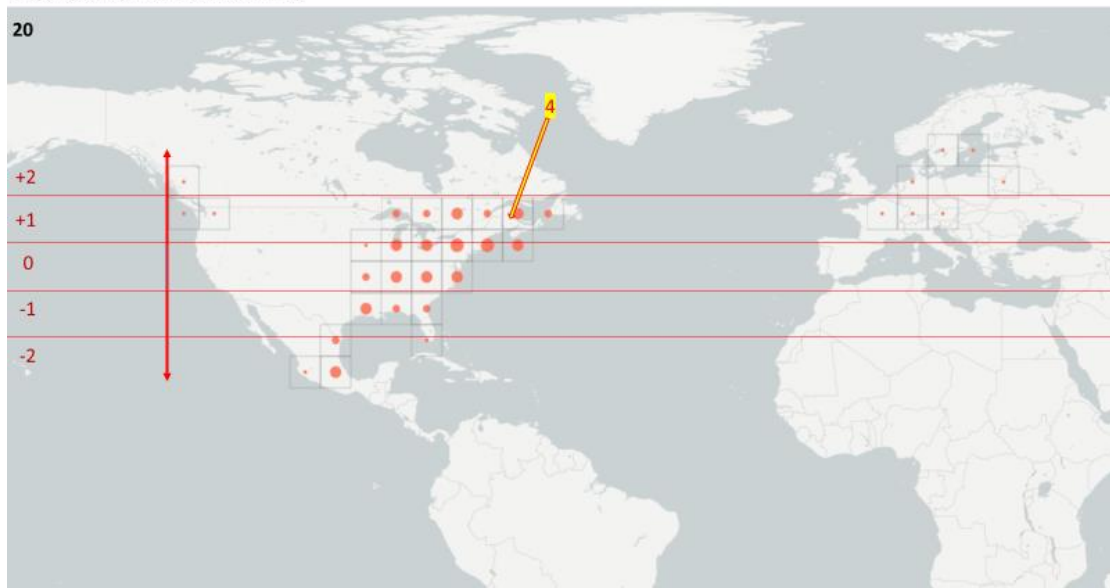
**Εικόνα 4.29.** Γεωγραφική κατανομή του είδους *Entandrophragma cylindricum* (Global Biodiversity Information Facility, 2019).

*Erythrophloeum ivorense* distribution map



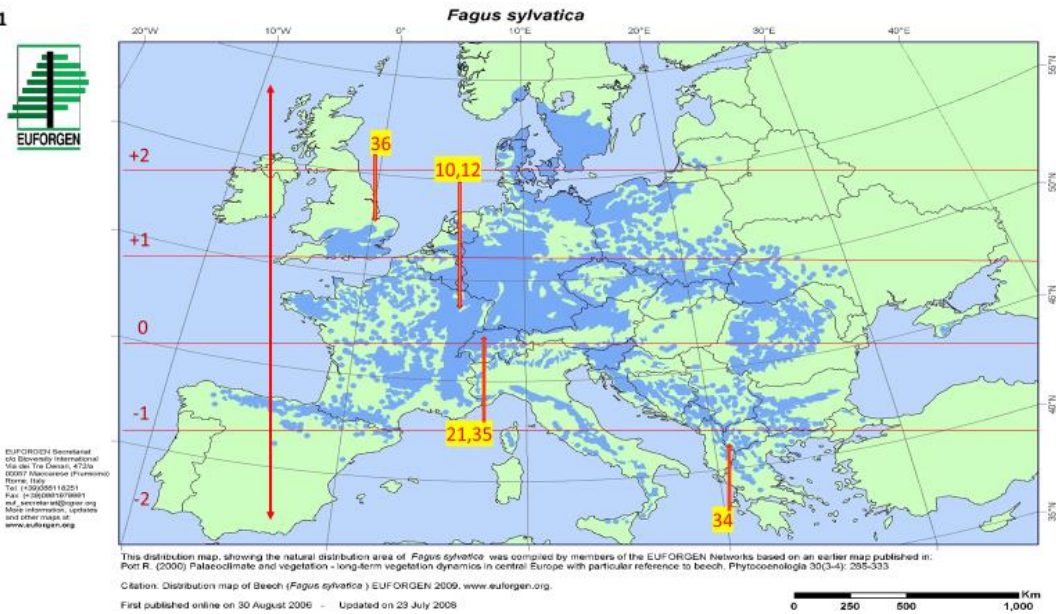
**Εικόνα 4.30.** Γεωγραφική κατανομή του είδους *Erythrophloeum ivorense* (Global Biodiversity Information Facility, 2019).

*Fagus grandifolia* distribution map



**Εικόνα 4.31.** Γεωγραφική κατανομή του είδους *Fagus grandifolia* (Global Biodiversity Information Facility, 2019).

21

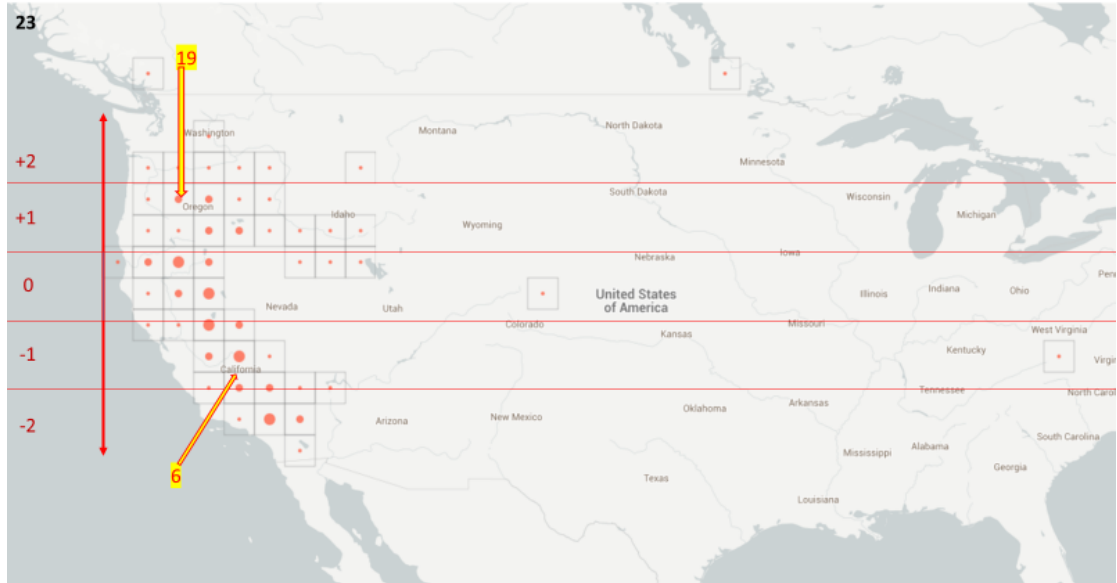


**Εικόνα 4.32.** Γεωγραφική κατανομή του είδους *Fagus sylvatica* (EUFORGEN, 2019).

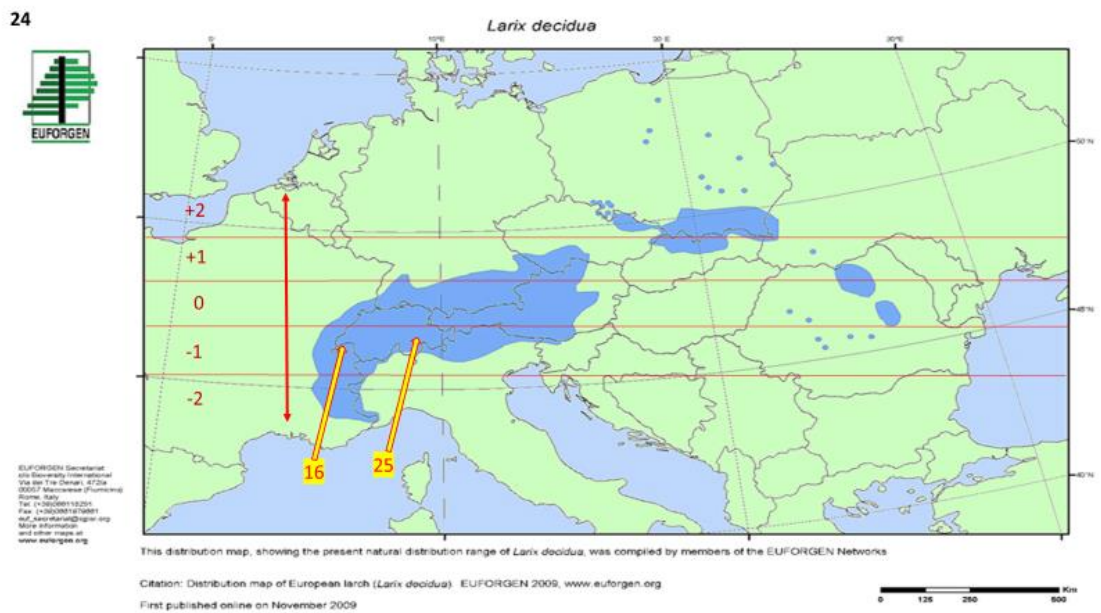


**Εικόνα 4.33.** Γεωγραφική κατανομή του είδους *Fraxinus americana* (Global Biodiversity Information Facility, 2019).

*Juniperus occidentalis* distribution map



**Εικόνα 4.34.** Γεωγραφική κατανομή του είδους *Juniperus Occidentalis* (Global Biodiversity Information Facility, 2019).

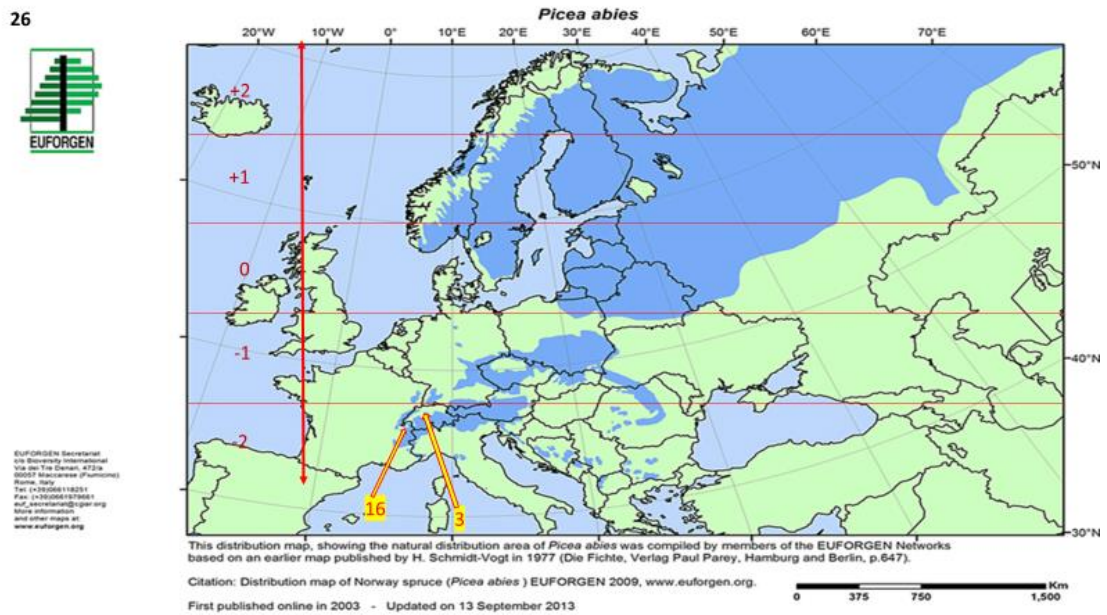


**Εικόνα 4.35.** Γεωγραφική κατανομή του είδους *Larix decidua* (EUFORGEN, 2019).

*Peltogyne heterphylla* distribution map



**Εικόνα 4.36.** Γεωγραφική κατανομή του είδους *Peltogyne heterphylla* (Global Biodiversity Information Facility, 2019).



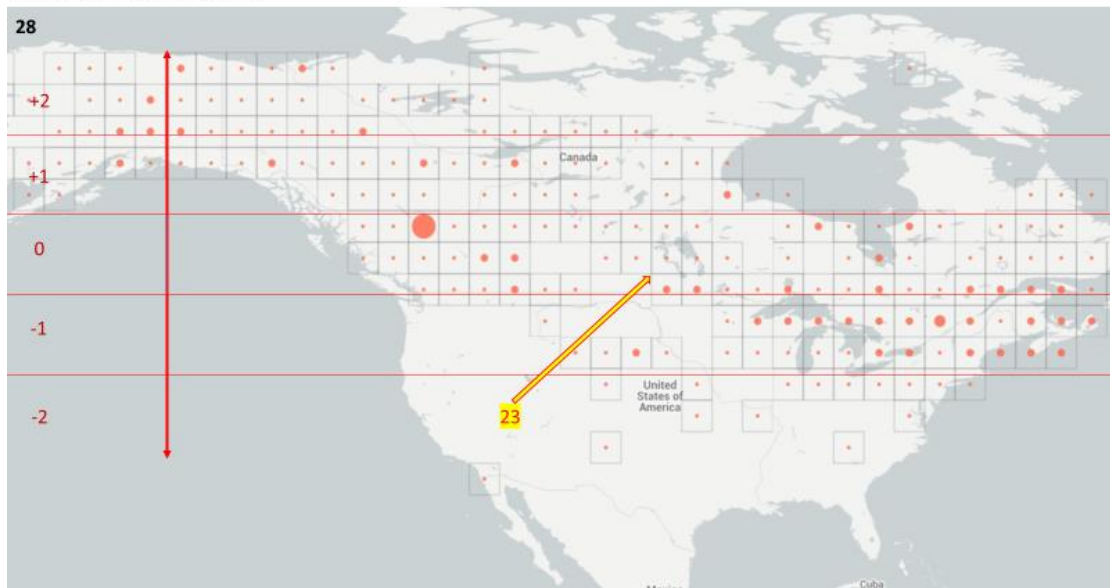
**Εικόνα 4.37.** Γεωγραφική κατανομή του είδους *Picea abies* (EUFORGEN, 2019).

*Picea engelmannii* distribution map



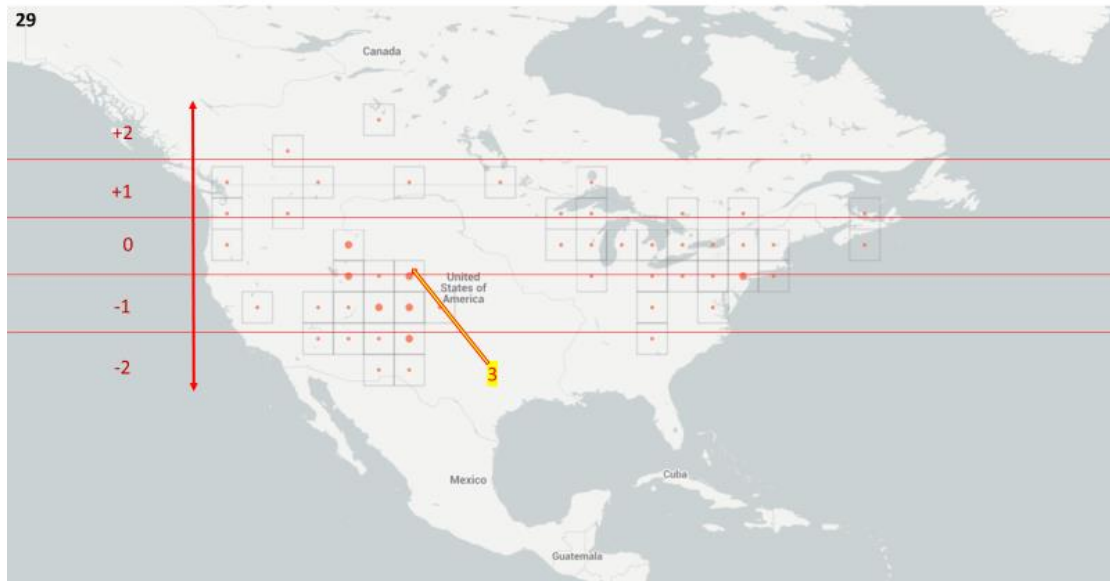
**Εικόνα 4.38.** Γεωγραφική κατανομή του είδους *Picea engelmannii* (Global Biodiversity Information Facility, 2019).

*Picea glauca* distribution map



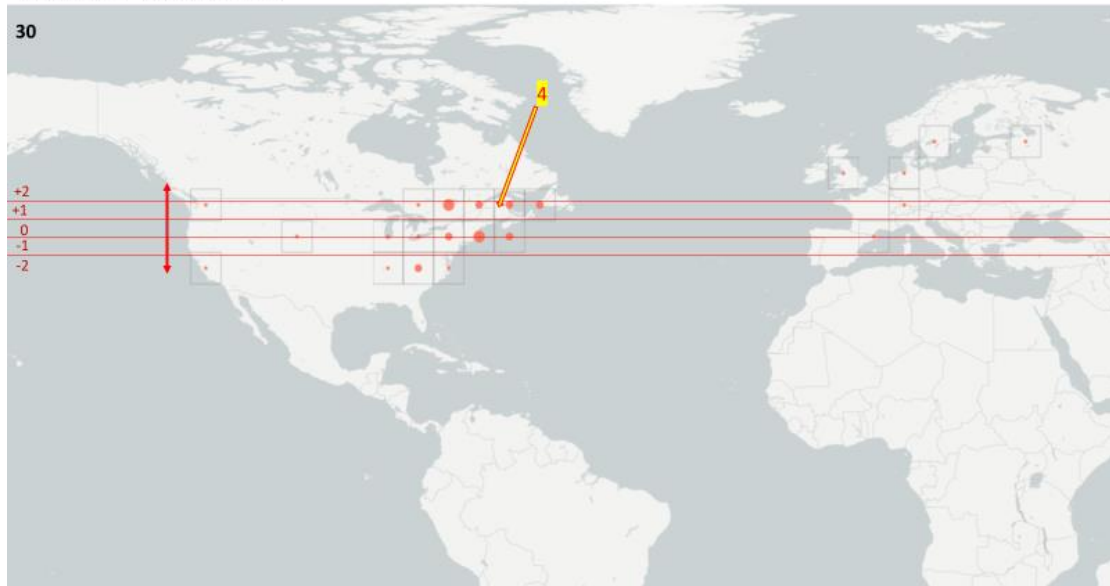
**Εικόνα 4.39.** Γεωγραφική κατανομή του είδους *Picea glauca* (Global Biodiversity Information Facility, 2019).

*Picea pungens* distribution map



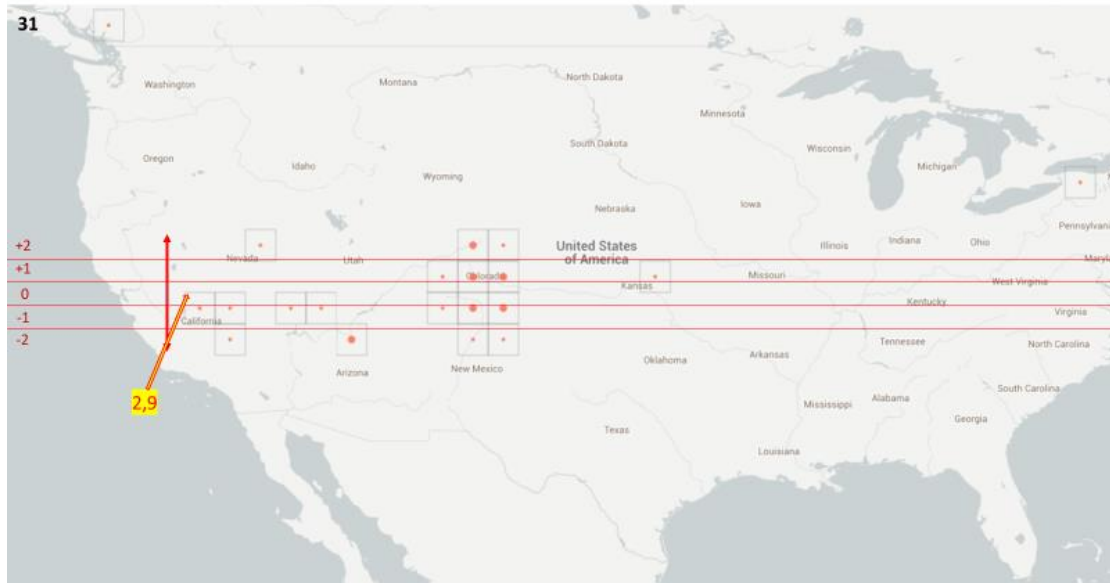
**Εικόνα 4.40.** Γεωγραφική κατανομή του είδους *Picea pungens* (Global Biodiversity Information Facility, 2019).

*Picea rubens* distribution map



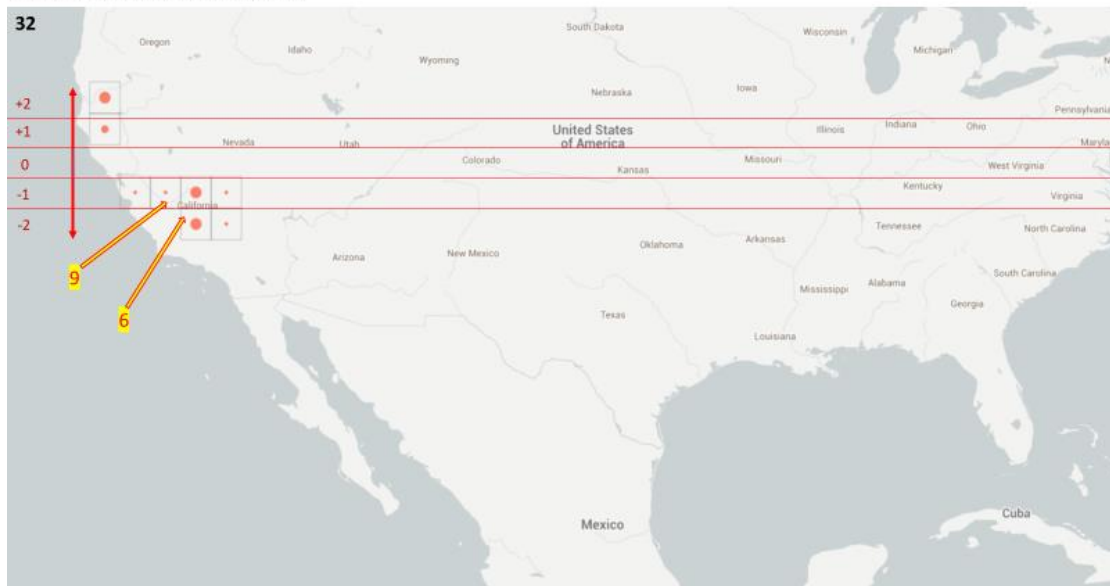
**Εικόνα 4.41.** Γεωγραφική κατανομή του είδους *Picea rubens* (Global Biodiversity Information Facility, 2019).

*Pinus aristata* distribution map



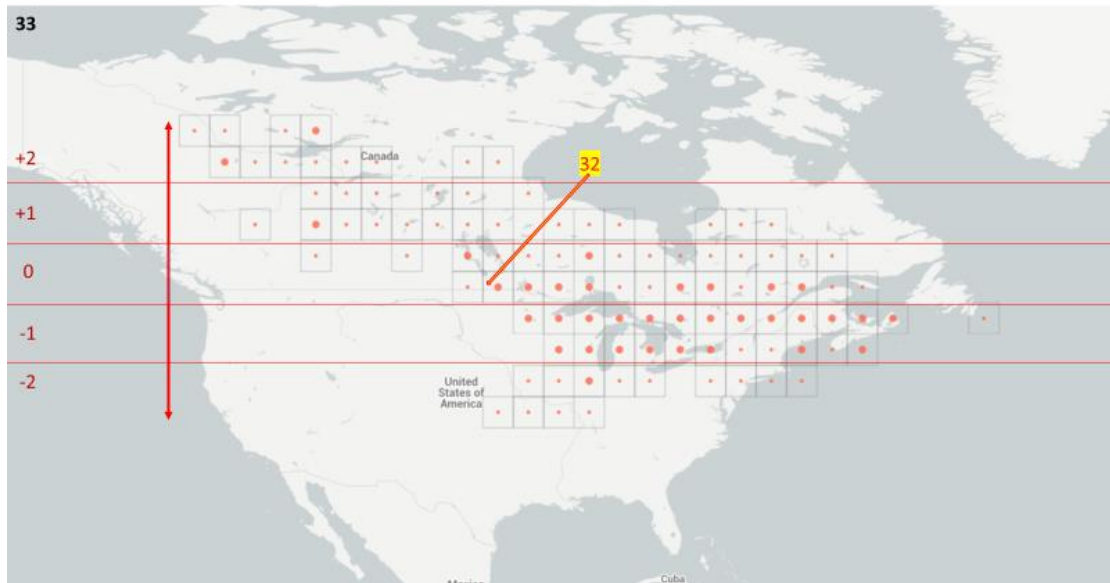
**Εικόνα 4.42.** Γεωγραφική κατανομή του είδους *Pinus aristata* (Global Biodiversity Information Facility, 2019).

*Pinus balfouriana* distribution map

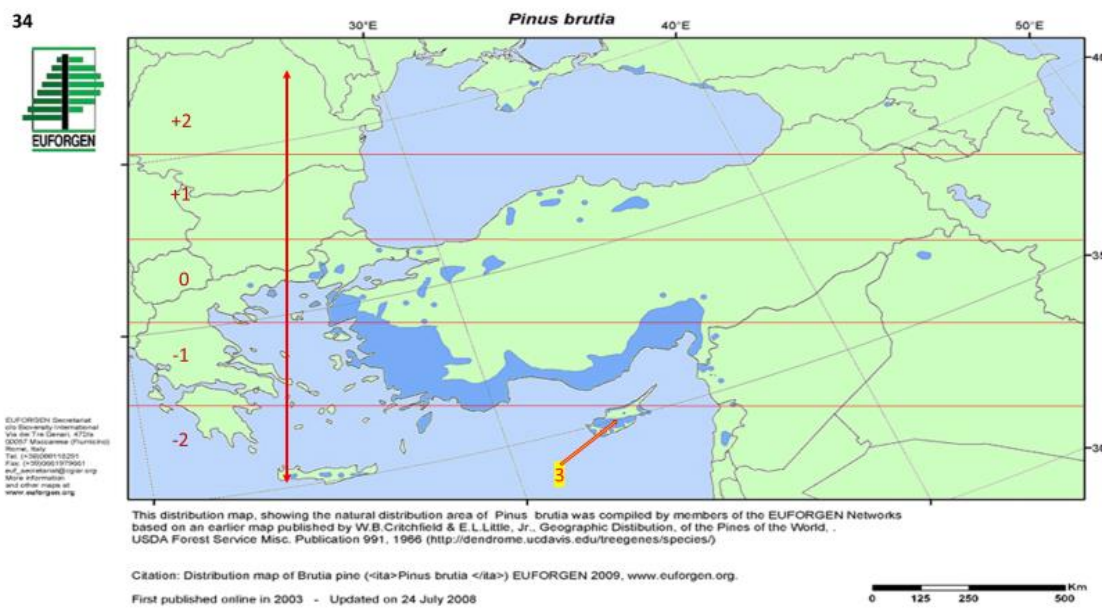


**Εικόνα 4.43.** Γεωγραφική κατανομή του είδους *Pinus balfouriana* (Global Biodiversity Information Facility, 2019).

*Pinus banksiana* distribution map



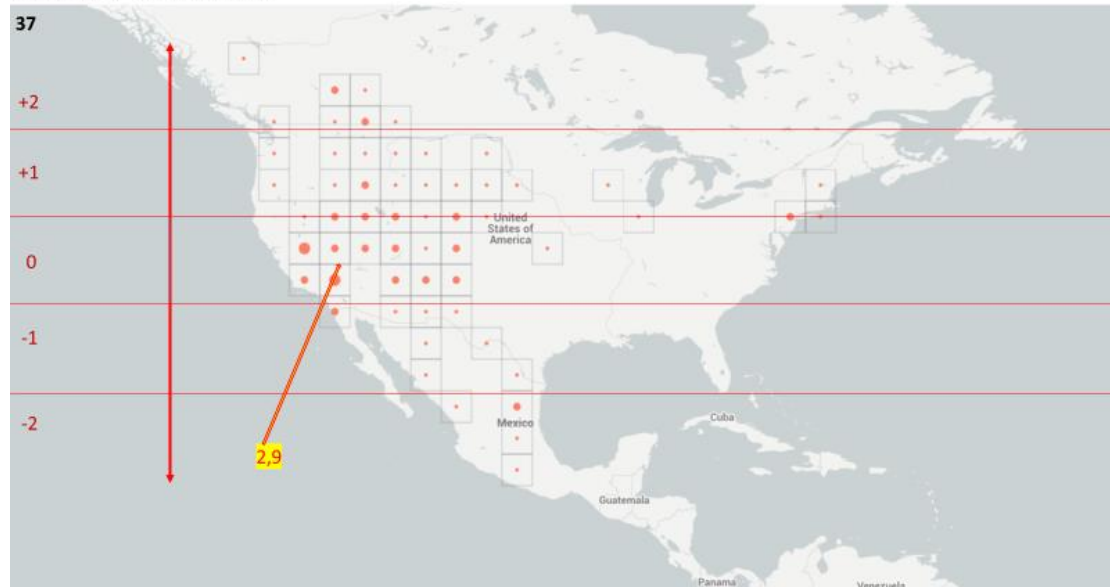
**Εικόνα 4.44.** Γεωγραφική κατανομή του είδους *Pinus banksiana* (Global Biodiversity Information Facility, 2019).



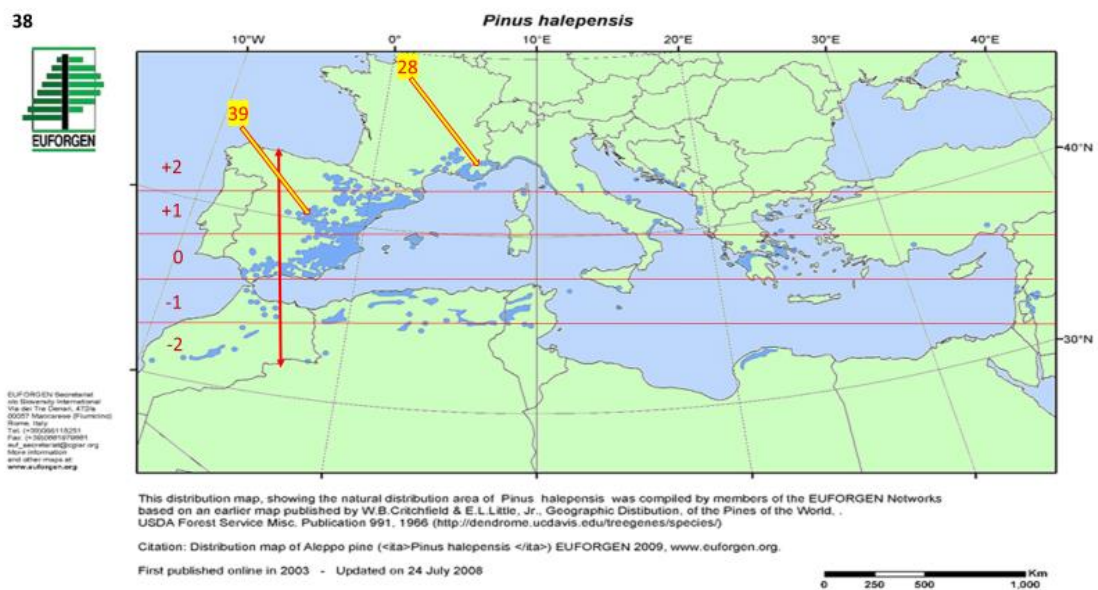
**Εικόνα 4.45.** Γεωγραφική κατανομή του είδους *Pinus brutia* (EUFORGEN, 2019).



*Pinus flexilis* distribution map

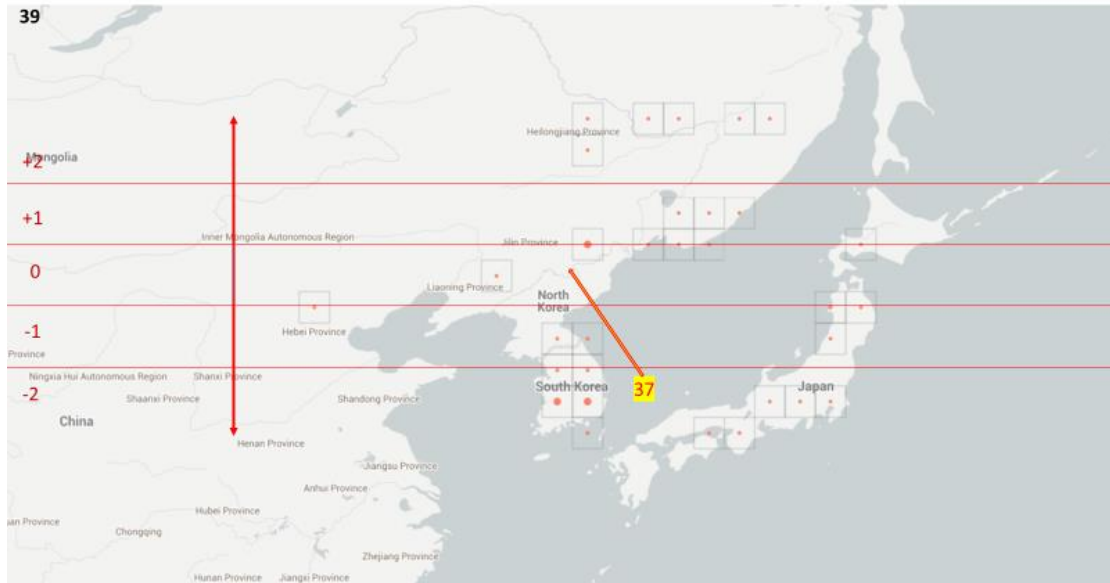


Εικόνα 4.48. Γεωγραφική κατανομή του είδους *Pinus flexilis* (Global Biodiversity Information Facility, 2019).



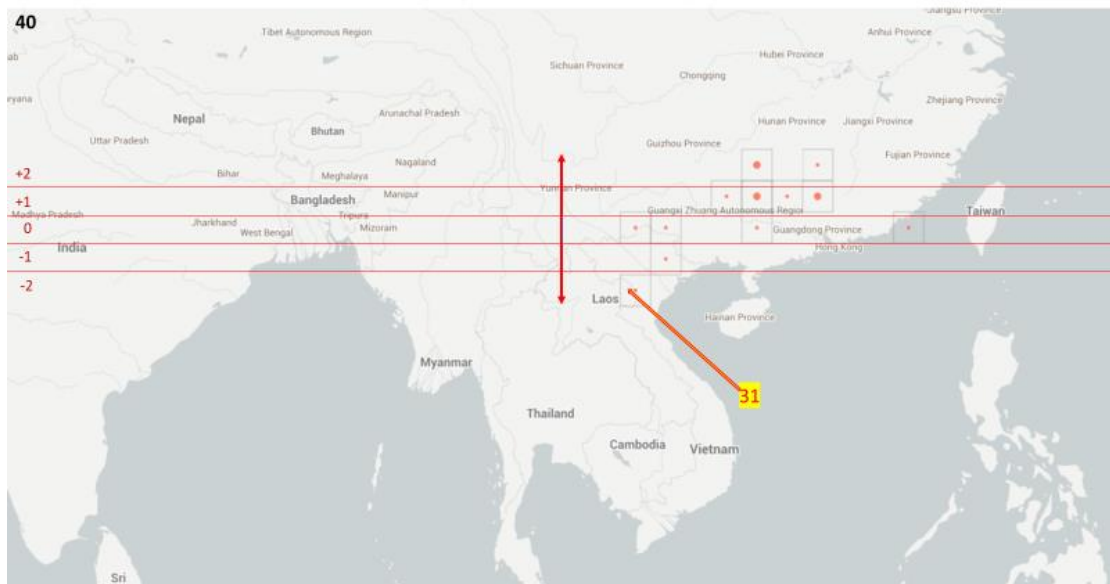
Εικόνα 4.49. Γεωγραφική κατανομή του είδους *Pinus halepensis* (EUFORGEN, 2019).

*Pinus koraiensis* distribution map



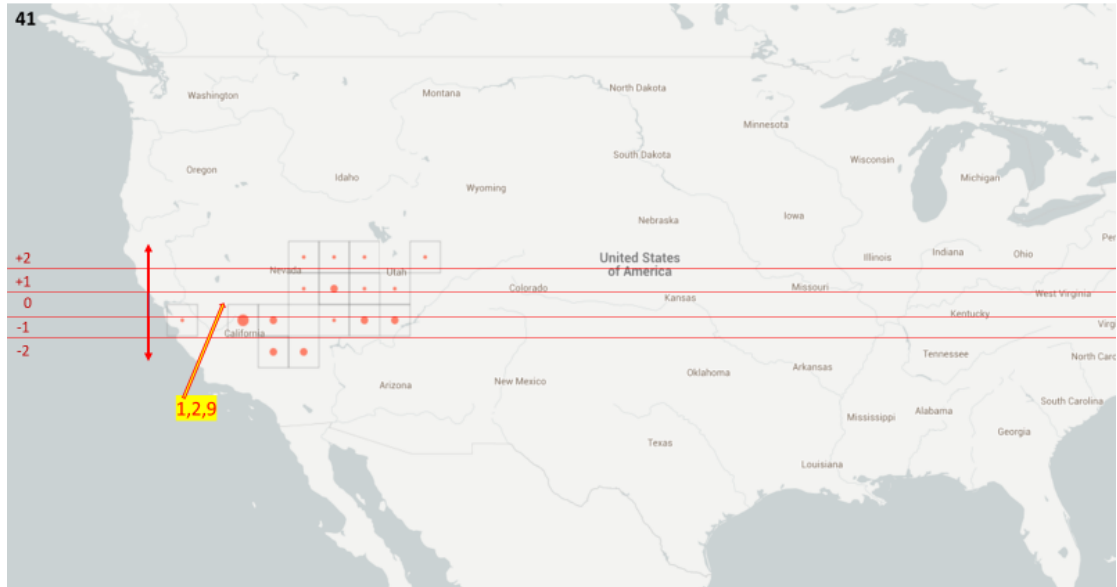
**Εικόνα 4.50.** Γεωγραφική κατανομή του είδους *Pinus koraiensis* (Global Biodiversity Information Facility, 2019).

*Pinus kwangtungensis* distribution map



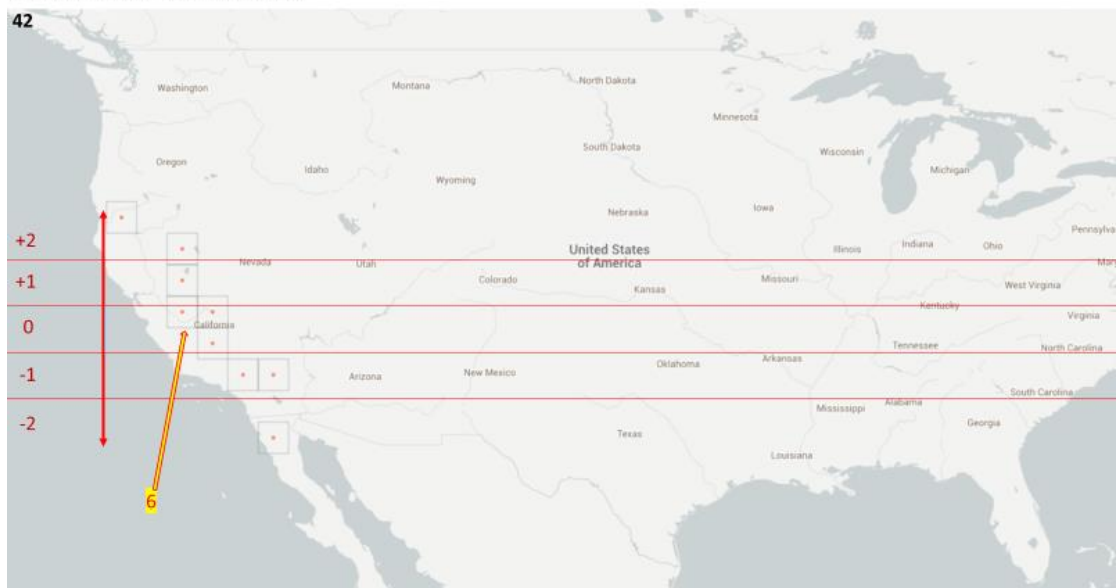
**Εικόνα 4.51.** Γεωγραφική κατανομή του είδους *Pinus kwangtungensis* (Global Biodiversity Information Facility, 2019).

*Pinus longaeva* distribution map



Εικόνα 4.52. Γεωγραφική κατανομή του είδους *Pinus longaeva* (Global Biodiversity Information Facility, 2019).

*Pinus murayana* distribution map

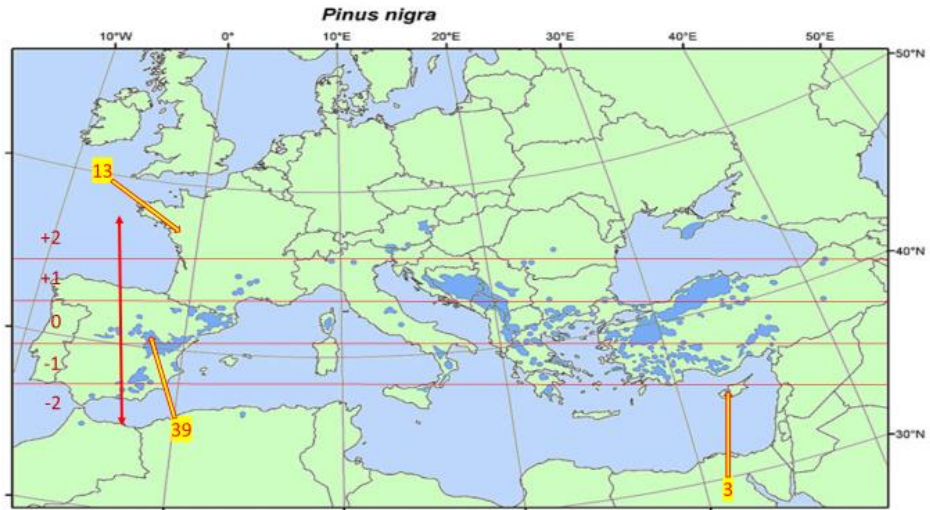


Εικόνα 4.53. Γεωγραφική κατανομή του είδους *Pinus murayana* (Global Biodiversity Information Facility, 2019).

43



EUFORGEN Secretariat  
 c/o Biodiversity International  
 Via del Ticino, 6726  
 00057 Montecelio (Rome) Italy  
 Tel: +39 06 61 18221  
 Fax: +39 06 61 18222  
 euf\_secretariat@euforgen.org  
 More information  
 and other news at  
 www.euforgen.org



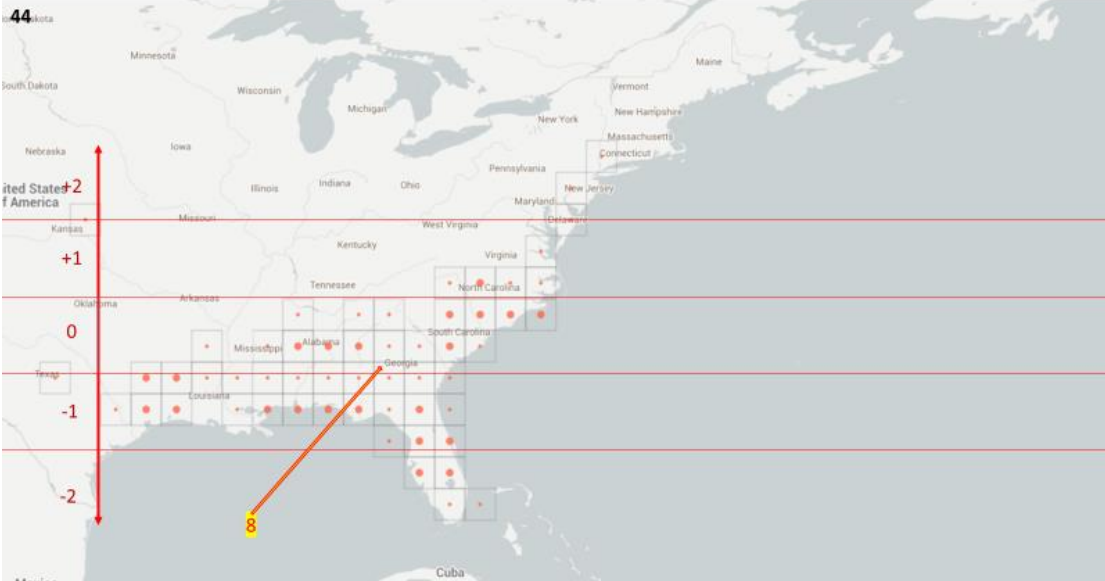
This distribution map, showing the natural distribution area of *Pinus nigra* was compiled by members of the EUFORGEN Networks  
 Citation: Distribution map of Black pine (*Pinus nigra*) EUFORGEN 2009. www.euforgen.org.

First published online on 26 March 2005 - Updated on 5 December 2011



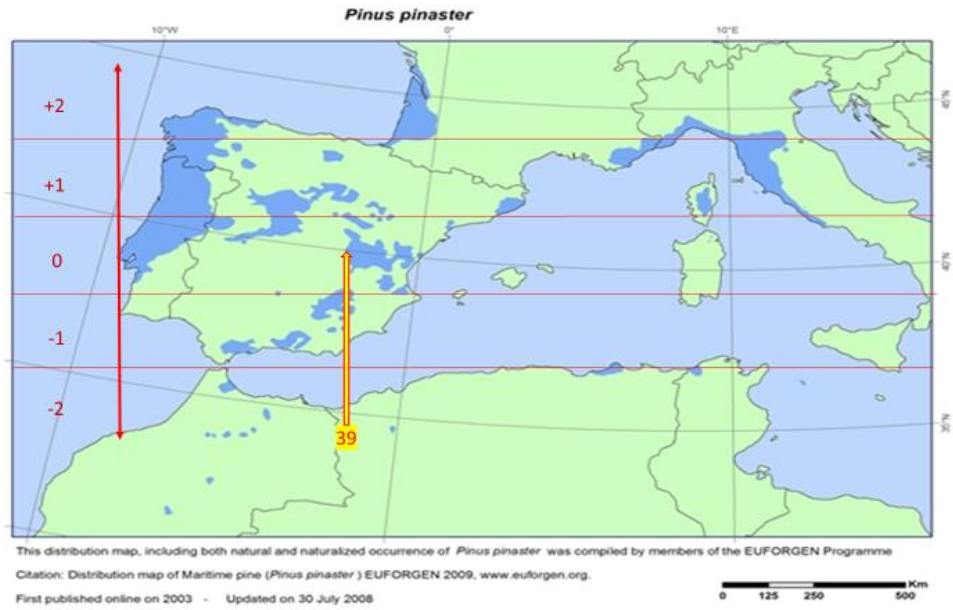
**Εικόνα 4.54.** Γεωγραφική κατανομή του είδους *Pinus nigra* (EUFORGEN, 2019).

*Pinus palustris* distribution map



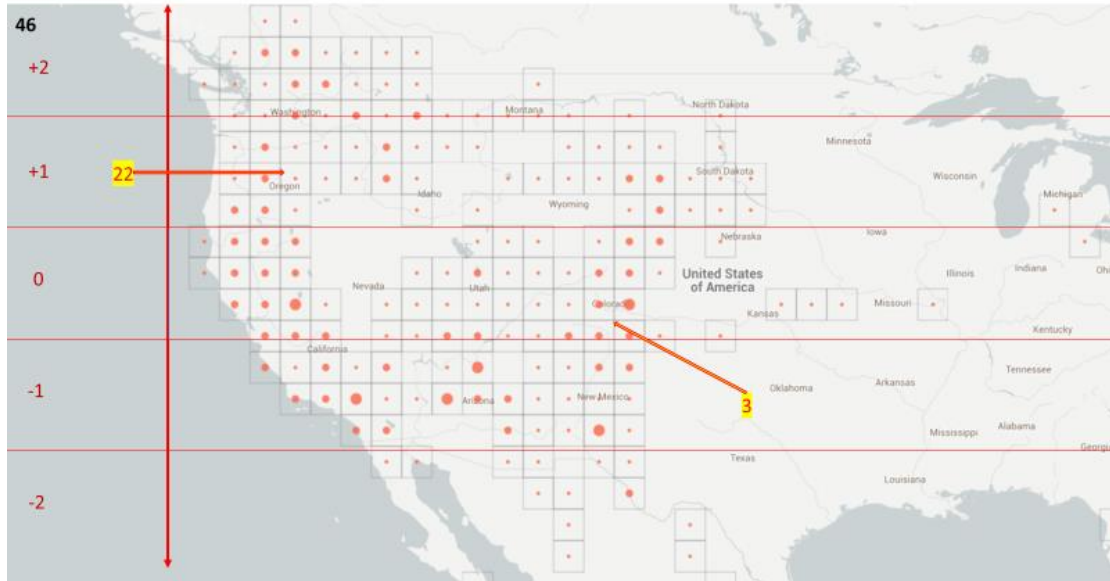
**Εικόνα 4.55.** Γεωγραφική κατανομή του είδους *Pinus palustris* (Global Biodiversity Information Facility, 2019).

45



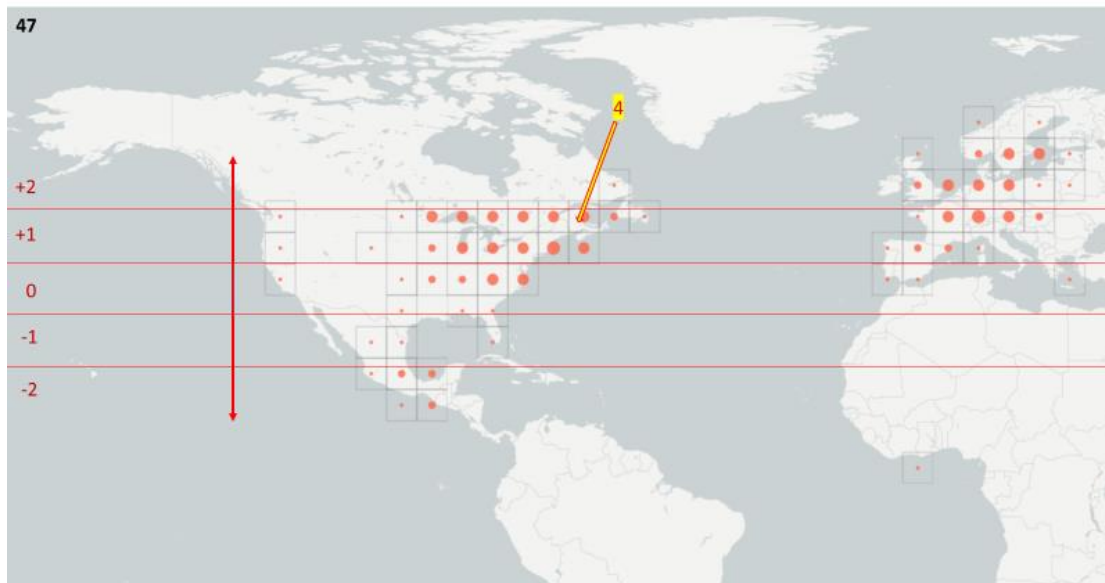
**Εικόνα 4.56.** Γεωγραφική κατανομή του είδους *Pinus pinaster* (EUFORGEN, 2019).

*Pinus ponderosa* distribution map

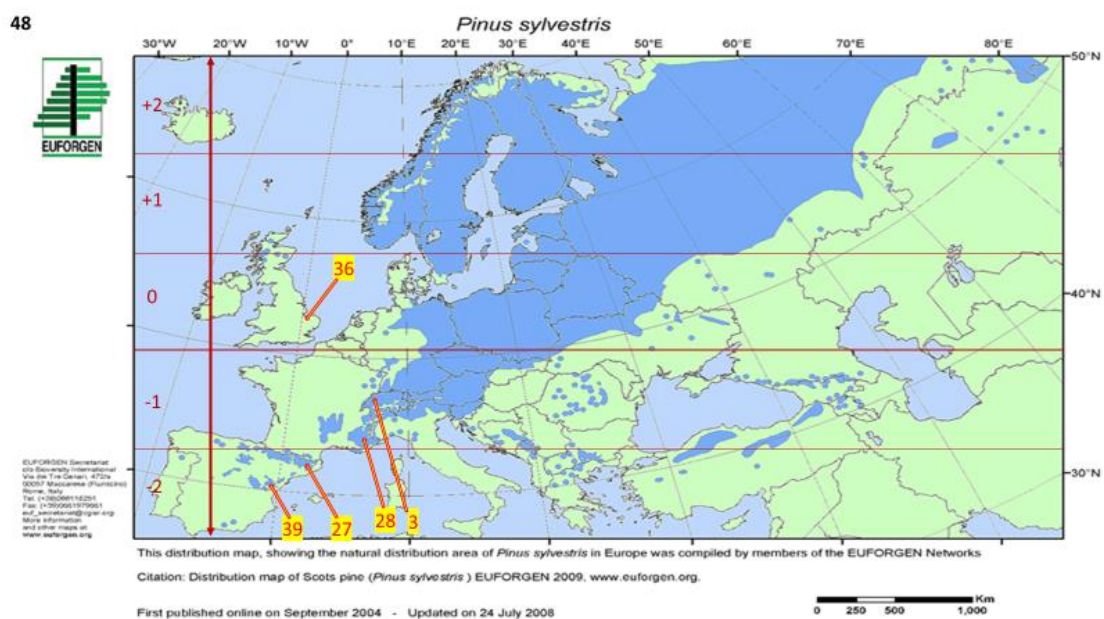


**Εικόνα 4.57.** Γεωγραφική κατανομή του είδους *Pinus ponderosa* (Global Biodiversity Information Facility, 2019).

*Pinus strobus* distribution map

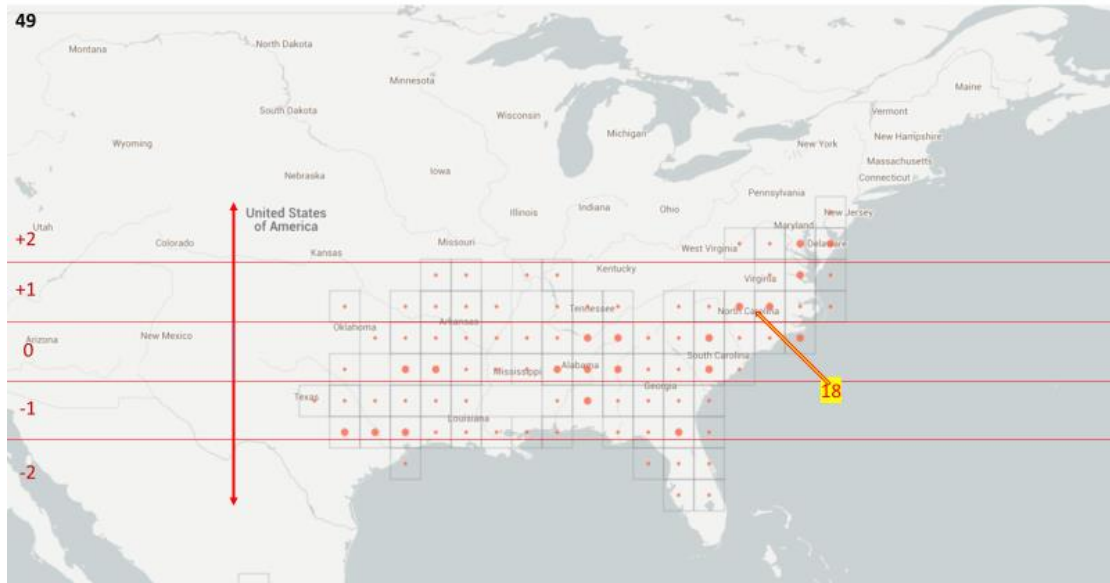


Εικόνα 4.58. Γεωγραφική κατανομή του είδους *Pinus strobus* (Global Biodiversity Information Facility, 2019).



Εικόνα 4.59. Γεωγραφική κατανομή του είδους *Pinus sylvestris* (EUFORGEN, 2019).

*Pinus taeda* distribution map



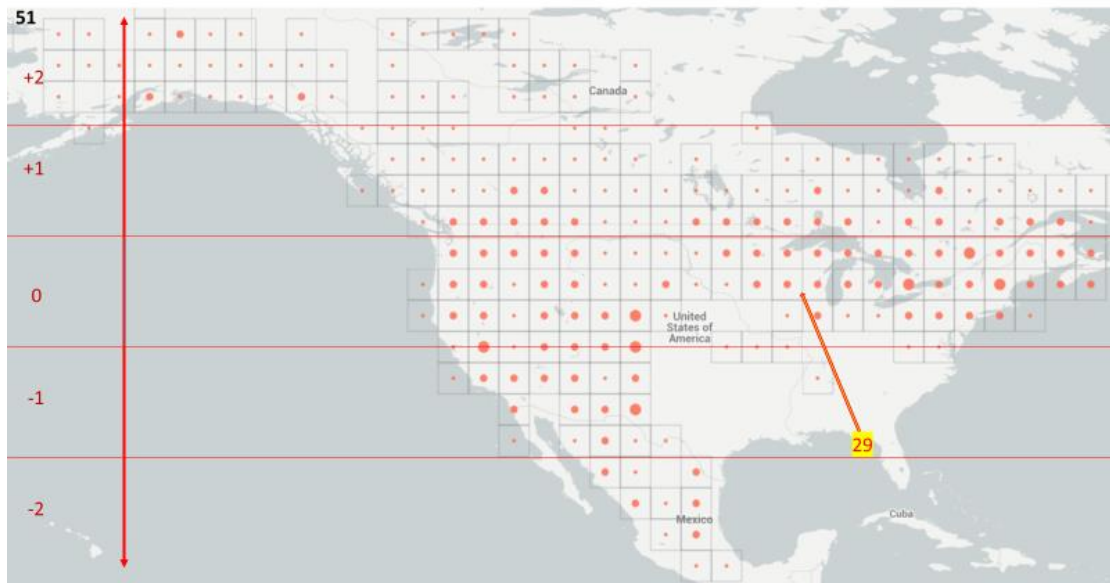
**Εικόνα 4.60.** Γεωγραφική κατανομή του είδους *Pinus taeda* (Global Biodiversity Information Facility, 2019).

*Pinus uncinata* distribution map

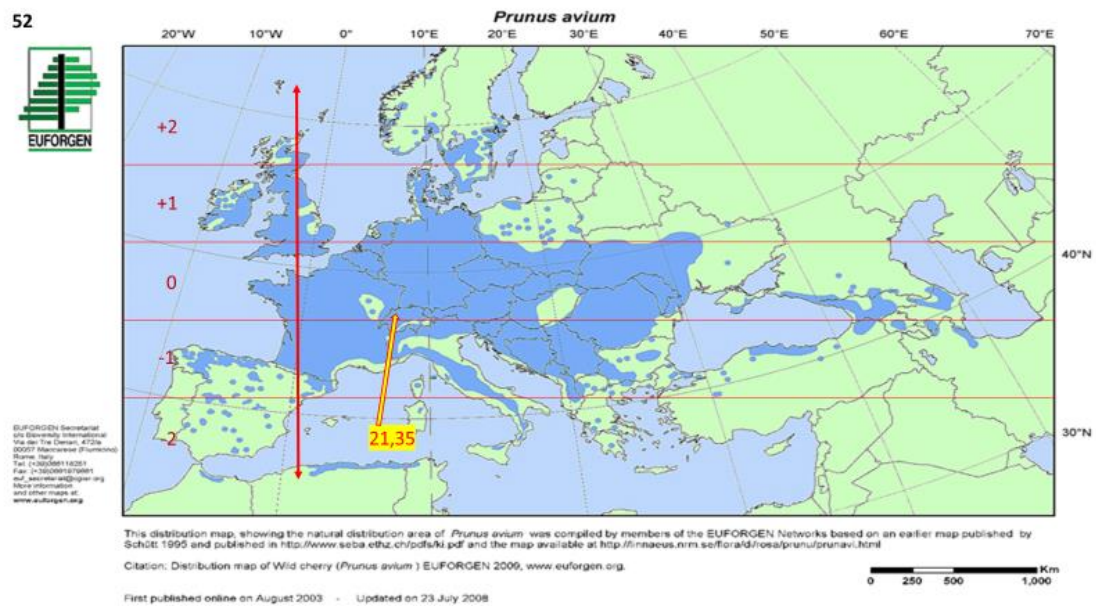


**Εικόνα 4.61.** Γεωγραφική κατανομή του είδους *Pinus uncinata* (Global Biodiversity Information Facility, 2019).

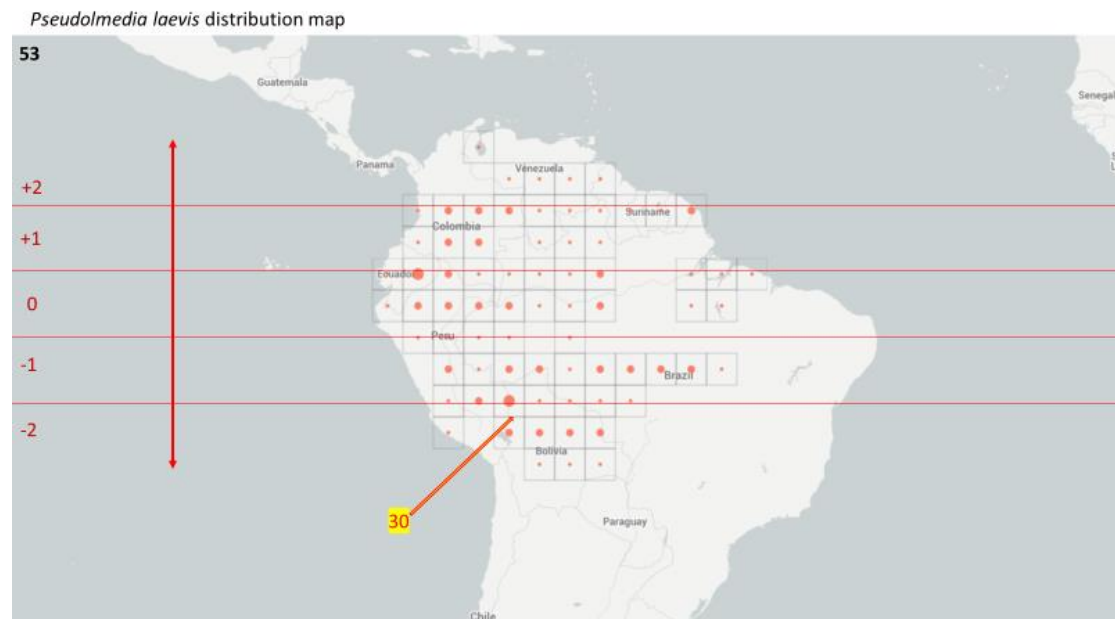
*Populus tremuloides* distribution map



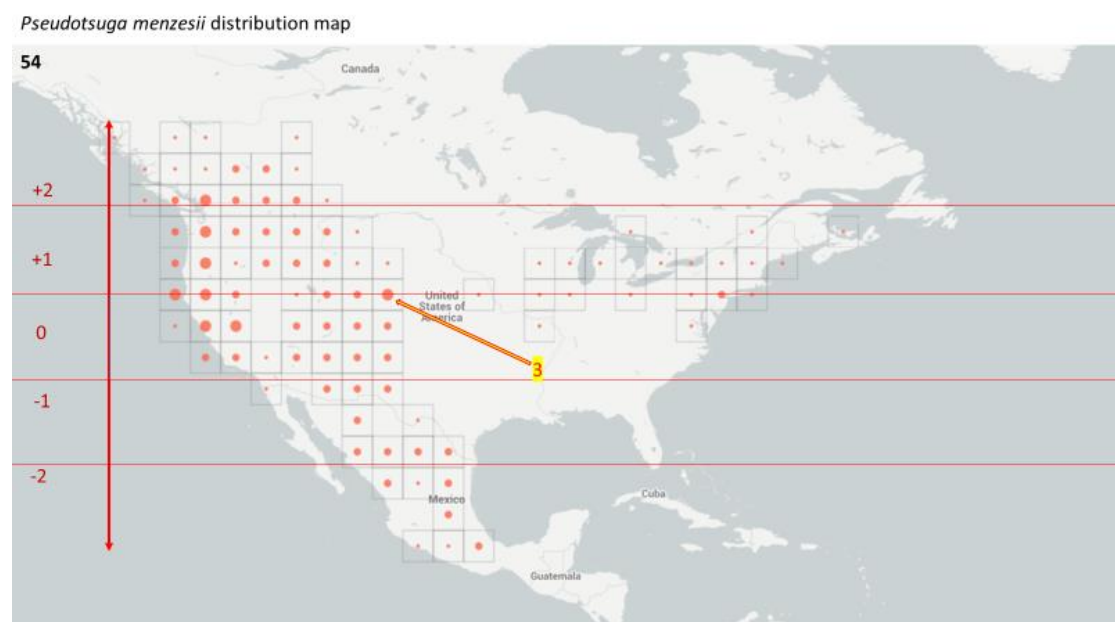
Εικόνα 4.62. Γεωγραφική κατανομή του είδους *Populus tremuloides* (Global Biodiversity Information Facility, 2019).



Εικόνα 4.63. Γεωγραφική κατανομή του είδους *Prunus avium* (EUFORGEN, 2019).

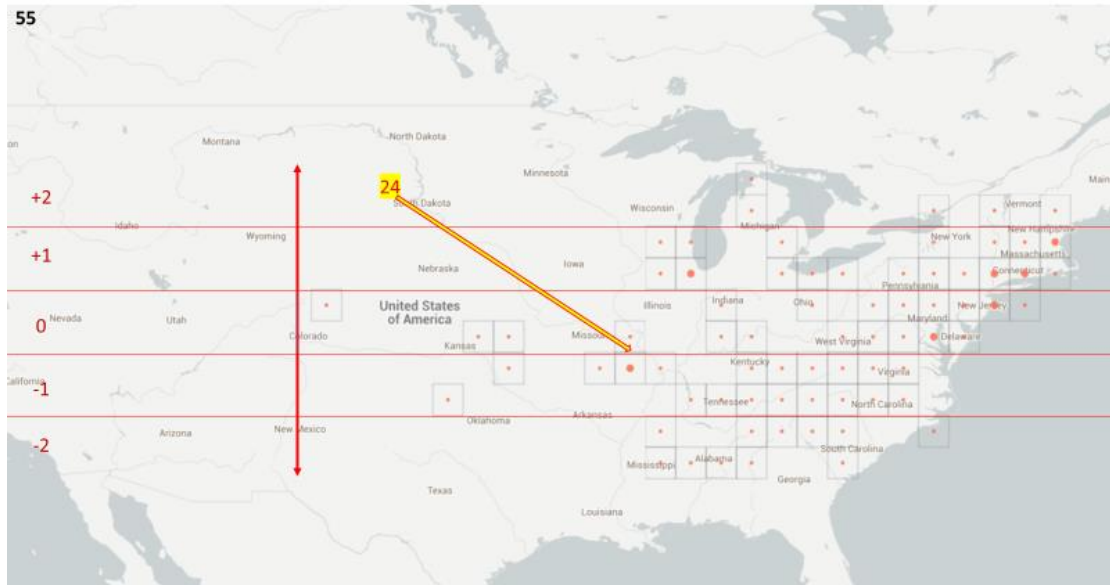


**Εικόνα 4.64.** Γεωγραφική κατανομή του είδους *Pseudolmedia laevis* (Global Biodiversity Information Facility, 2019).



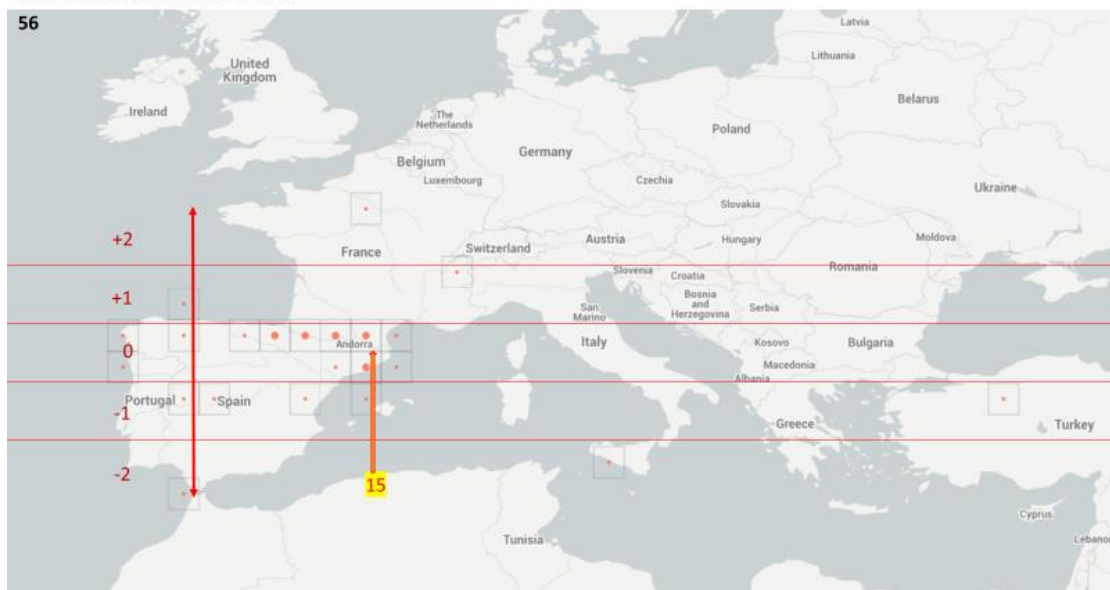
**Εικόνα 4.65.** Γεωγραφική κατανομή του είδους *Pseudotsuga menziesii* (Global Biodiversity Information Facility, 2019).

*Quercus coccinea* distribution map



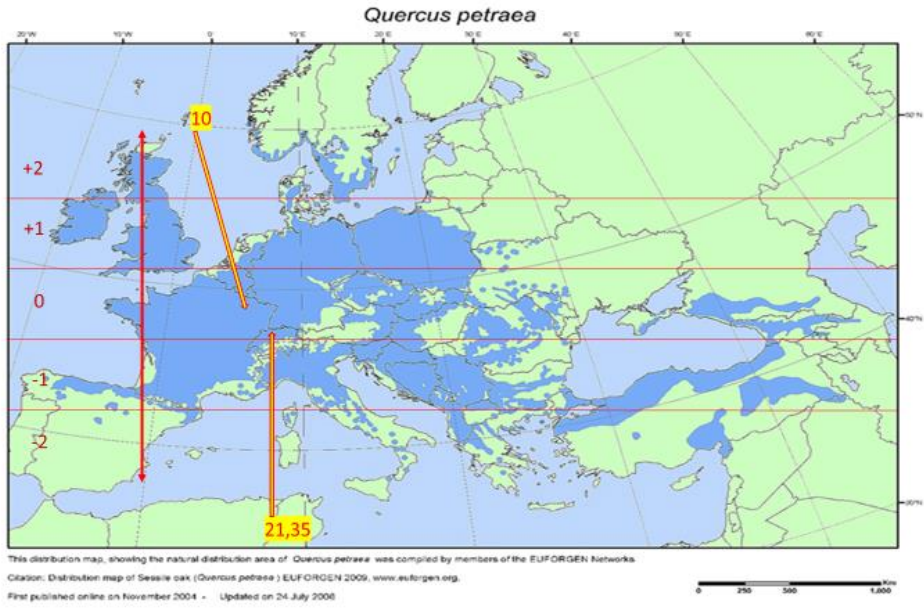
**Εικόνα 4.66.** Γεωγραφική κατανομή του είδους *Quercus coccinea* (Global Biodiversity Information Facility, 2019).

*Quercus humilis* distribution map



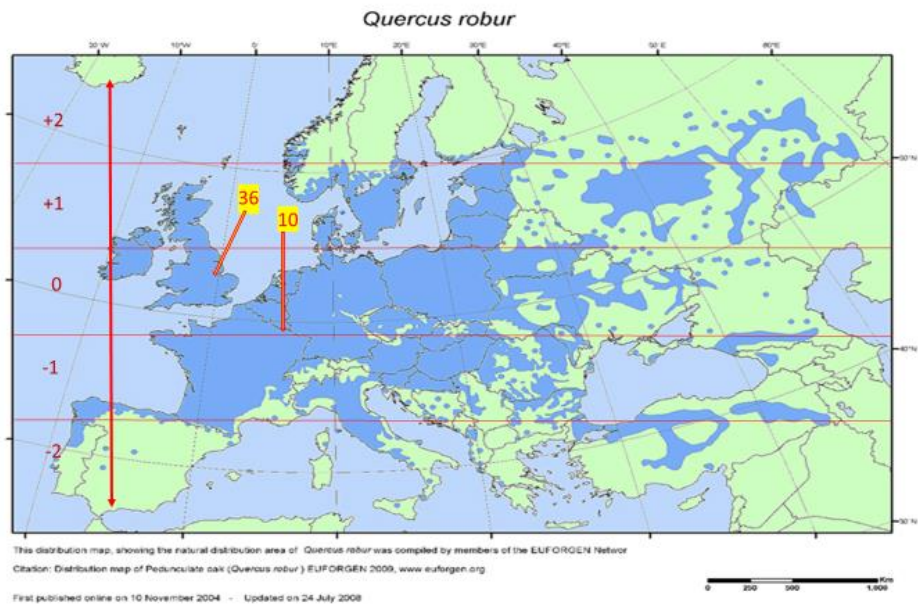
**Εικόνα 4.67.** Γεωγραφική κατανομή του είδους *Quercus humilis* (Global Biodiversity Information Facility, 2019).

57



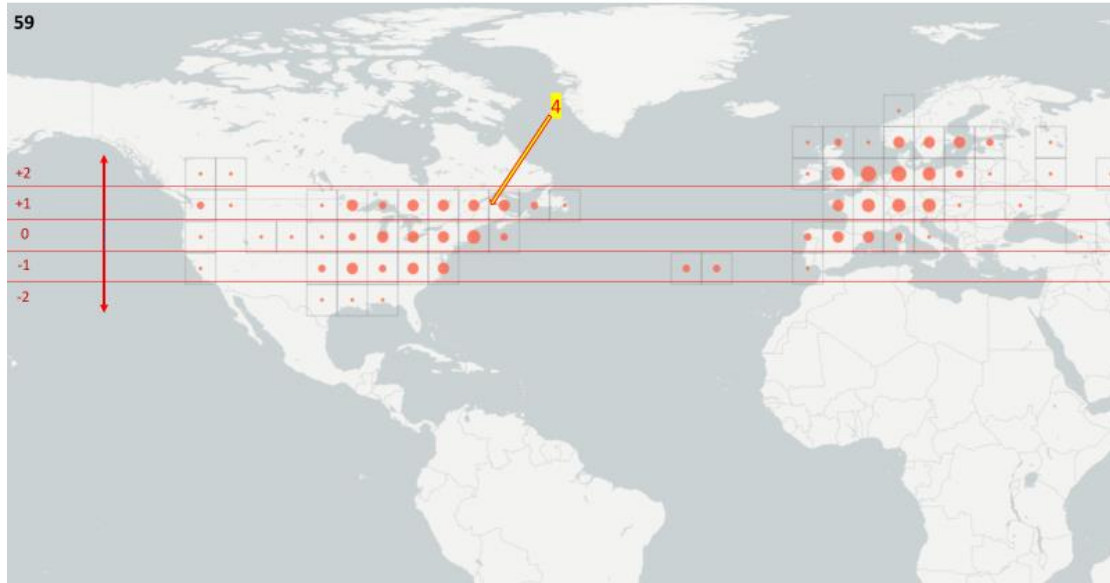
Εικόνα 4.68. Γεωγραφική κατανομή του είδους *Quercus petraea* (EUFORGEN, 2019).

58



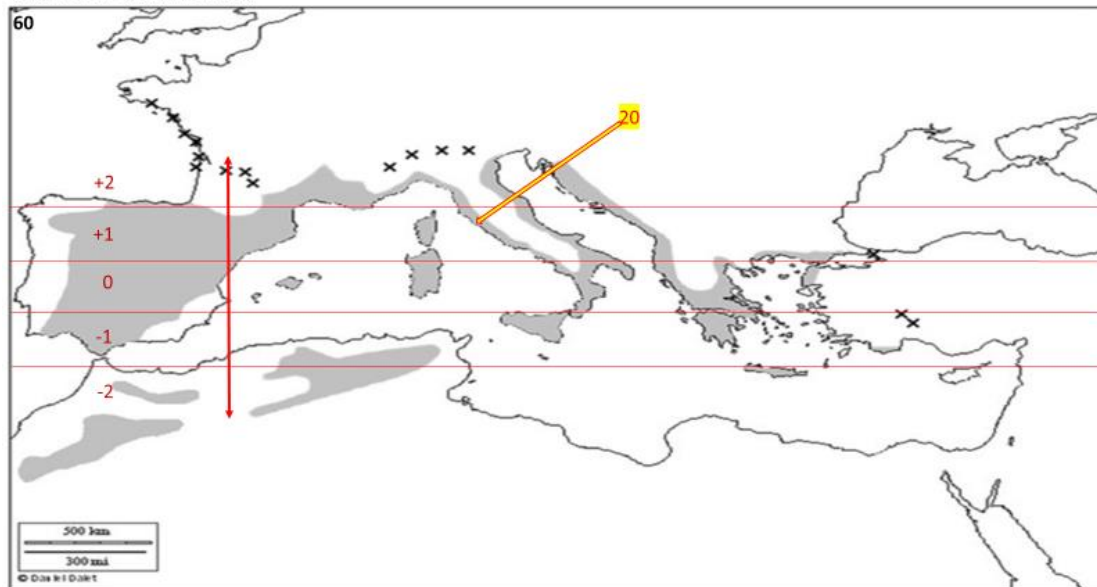
Εικόνα 4.69. Γεωγραφική κατανομή του είδους *Quercus robur* (EUFORGEN, 2019).

*Quercus rubra* distribution map



**Εικόνα 4.70.** Γεωγραφική κατανομή του είδους *Quercus rubra* (Global Biodiversity Information Facility, 2019).

*Quercus ilex* distribution map

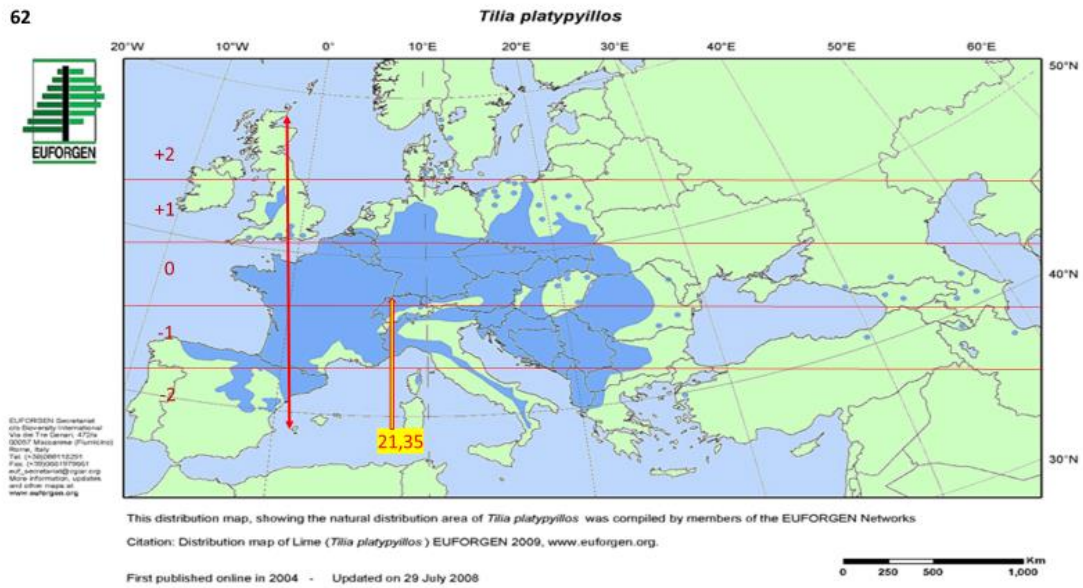


**Εικόνα 4.71.** Γεωγραφική κατανομή του είδους *Quercus ilex* (Delzon, et al., 2013).

*Quercus velutina* distribution map

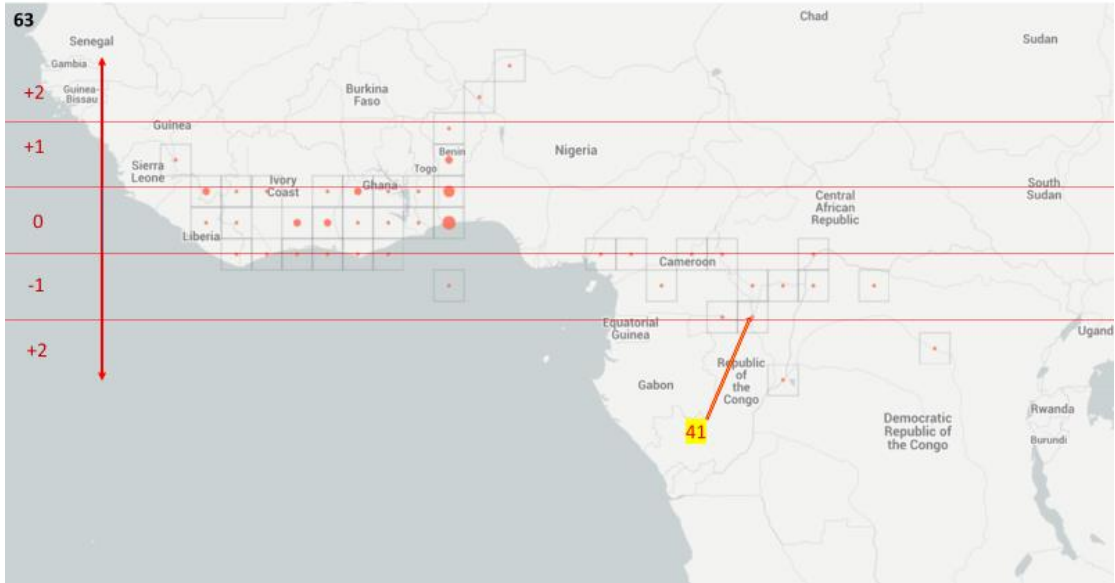


**Εικόνα 4.72.** Γεωγραφική κατανομή του είδους *Quercus velutina* (Global Biodiversity Information Facility, 2019).



**Εικόνα 4.73.** Γεωγραφική κατανομή του είδους *Tilia platyphyllos* (EUFORGEN, 2019).

*Triplochiton scleroxylon* distribution map



**Εικόνα 4.74.** Γεωγραφική κατανομή του είδους *Triplochiton scleroxylon* (Global Biodiversity Information Facility, 2019).

*Tsuga canadensis* distribution map



**Εικόνα 4.75.** Γεωγραφική κατανομή του είδους *Tsuga canadensis* (Global Biodiversity Information Facility, 2019).

Με τη χρήση των πιο πάνω δεδομένων έγινε χαρακτηρισμός της θέσης μελέτης ως προς τα θερμικά όρια της βλάστησης σε σχέση με το υψόμετρο όπως αυτό περιγράφεται στο Κεφάλαιο 3.

Για σκοπούς περαιτέρω ανάλυσης τα πιο πάνω ευρήματα υψόμετρο, συντεταγμένες, τάσεις θερμοκρασίας και κατακρημνίσεων, συσχέτιση της θέσης μελέτης με το μέσο γεωγραφικό πλάτος της κατανομής της βλάστησης και χαρακτηρισμός της θέσης μελέτης ως προς τα θερμικά όρια της βλάστησης καταγράφηκαν στον πίνακα 4.7. Στον πίνακα 4.7. γίνεται καταγραφή των εργασιών κατά τις θέσεις μελέτης ή τα είδη που έχουν μελετήσει. Προέκυψαν 99 περιπτώσεις.

**Πίνακας 4.7.** Πίνακας δεδομένων εργασιών πεδίου ανά είδος βλάστησης που μελετήθηκε. (όπου Α σημαίνει αύξηση και όπου Μ, μη επίδραση του ατμοσφαιρικού CO<sub>2</sub> στην παραγωγικότητα των δασών. Όπου Ψ, ψυχροόρια, όπου Ε, ενδιάμεσα και όπου Ξ, ξηροθερμικά).

A/A	Αναφορά Δημοσίευσης	Impact factor	Ημερομ.	Αριθμός αναφορών	Τοποθεσία	Μεθοδολογία	Είδος δέντρων/βλάστησης	Λέξη κλειδί	Αποτέλεσμα	Υψόμετρο	Συντεταγμένες	Τάση θερμοκρασίας της θέσης μελέτης από ανάλυση διατριβής	Τάση Κατακρημνίσεων της θέσης μελέτης από ανάλυση διατριβής	Θέση μελέτης / μέσο γεωγραφικό πλάτος περιοχής κατανομής	ξηροθερμικά όρια βλάστησης σε σχέση με το υψόμετρο της θέσης μελέτης
1	(Lamarche <i>et al.</i> , 1984)		7/9/1984	416	USA, California		Pinus longaeva +		<b>A</b>	D	yes	(+)	(+)	0	Ψ
2	(Graybill, 1986)	N/A	1986	54	Semiarid, western USA	Comparisons of growth	Pinus flexilis	[dioxido de carbono; anillo de crecimiento; arizona; california; californie; carbon dioxide; cerne; colorado; coniferas]; conifere; conifers; crecimiento; croissance; dioxyde de carbone; growth; growth rings; nevada; soil zonation; utah; zonalite;	<b>A</b>	D	yes	(+)	(+)	0	Ψ
2	(Graybill, 1986)	N/A	1986	54	Semiarid, western USA	Comparisons of growth	Pinus aristata	[dioxido de carbono; anillo de crecimiento; arizona; california; californie; carbon dioxide; cerne; colorado; coniferas]; conifere; conifers; crecimiento; croissance; dioxyde de carbone; growth; growth rings; nevada; soil zonation; utah; zonalite;	<b>A</b>	D	yes	(+)	(+)	0	Ψ

2	(Graybill, 1986)	N/A	1986	54	Semi-arid, western USA	Comparisons of growth	<i>Pinus longaeva</i>	[dioxido de carbono; anillo de crecimiento; arizona; california; californie; carbon dioxide; cerne; colorado; coniferas]; conifere; conifers; crecimiento; croissance; dioxyde de carbone; growth; growth rings; nevada; soil zonation; utah; zonalite;	<b>A</b>	D	yes	(+)	(+)	0	Ψ
3	(Kienast and Luxmoore, 1988)	3,13	6/11/1987	50	Cyprus		<i>Pinus brutia</i>	X-ray densitometry CO2 fertilization β-factor	<b>M</b>	B	yes	(+)	(-)	-2	E
3	(Kienast and Luxmoore, 1988)	3,13	6/11/1987	50	Cyprus		<i>Pinus nigra</i>	X-ray densitometry CO2 fertilization β-factor	<b>M</b>	C	yes	(+)	(-)	-2	Ψ
3	(Kienast and Luxmoore, 1988)	3,13	6/11/1987	50	Switzerland		<i>Picea abies</i>	X-ray densitometry CO2 fertilization β-factor	<b>M</b>	C	yes	(+)	(+)	-2	Ψ
3	(Kienast and Luxmoore, 1988)	3,13	6/11/1987	50	USA		<i>Picea engelmannii</i>	X-ray densitometry CO2 fertilization β-factor	<b>M</b>	D	yes	(+)	(+)	-2	Ψ
3	(Kienast and Luxmoore, 1988)	3,13	6/11/1987	50	Cyprus		<i>Cedrus brevifolia</i>	X-ray densitometry CO2 fertilization β-factor	<b>M</b>	B	yes	(+)	(-)	-1	E
3	(Kienast and Luxmoore, 1988)	3,13	6/11/1987	50	Switzerland		<i>Pinus sylvestris</i>	X-ray densitometry CO2 fertilization β-factor	<b>M</b>	B	yes	(+)	(+)	-1	E
3	(Kienast and Luxmoore, 1988)	3,13	6/11/1987	50	Switzerland		<i>Abies alba</i>	X-ray densitometry CO2 fertilization β-factor	<b>M</b>	B	yes	(+)	(+)	0	E
3	(Kienast and Luxmoore, 1988)	3,13	6/11/1987	50	USA		<i>Pinus Ponderosa</i>	X-ray densitometry CO2 fertilization β-factor	<b>M</b>	C	yes	(+)	(+)	0	Ψ
3	(Kienast and Luxmoore, 1988)	3,13	6/11/1987	50	USA		<i>Picea pungens</i>	X-ray densitometry CO2 fertilization β-factor	<b>M</b>	C	yes	(+)	(+)	0	Ψ
3	(Kienast and Luxmoore, 1988)	3,13	6/11/1987	50	USA		<i>Pseudotsuga menziesii</i>	X-ray densitometry CO2 fertilization β-factor	<b>M</b>	C	yes	(+)	(+)	0	Ψ
4	(Hornbeck, Smith and Federer, 1988)		1988	32	USA, New England		<i>Tsuga canadensis</i>		<b>A</b>	A	yes	(+)	(+)	1	Ξ

4	(Hornbeck, Smith and Federer, 1988)		1988	32	USA, New England		Acer rubrum		<b>A</b>	A	yes	(+)	(+)	1	Ξ
4	(Hornbeck, Smith and Federer, 1988)		1988	32	USA, New England		Acer saccharum		<b>A</b>	A	yes	(+)	(+)	1	Ξ
4	(Hornbeck, Smith and Federer, 1988)		1988	32	USA, New England		Betula alleghaniensis		<b>A</b>	A	yes	(+)	(+)	0	Ξ
4	(Hornbeck, Smith and Federer, 1988)		1988	32	USA, New England		Fagus grandifolia		<b>A</b>	A	yes	(+)	(+)	1	Ξ
4	(Hornbeck, Smith and Federer, 1988)		1988	32	USA, New England		Fraxinus americana		<b>A</b>	A	yes	(+)	(+)	1	Ξ
4	(Hornbeck, Smith and Federer, 1988)		1988	32	USA, New England		Picea rubens		<b>A</b>	A	yes	(+)	(+)	1	Ξ
4	(Hornbeck, Smith and Federer, 1988)		1988	32	USA, New England		Pinus strobus		<b>A</b>	A	yes	(+)	(+)	1	Ξ
4	(Hornbeck, Smith and Federer, 1988)		1988	32	USA, New England		Quercus rubra		<b>A</b>	A	yes	(+)	(+)	1	Ξ
5	(Becker, 1989a)	1,827	1989	235	France, NE, Vosges mountains		Abies alba		<b>A</b>	B	yes	(+)	(+)	0	E
6	(Graumlich, 1991)	4,809	Φεβ-91	232	southern Sierra Nevada.	Comparisons of growth trends Tree-ring sampling sites	<i>Pinus balfouriana</i>	California; climatic variation; CO2 fertilization; dendrochronology; increasing CO2; Juniperus occidentalis; Pinus balfouriana; Pinus murrayana	<b>M</b>	D	yes	(+)	(+)	-2	Ψ
6	(Graumlich, 1991)	4,809	Φεβ-91	232	southern Sierra Nevada.	Comparisons of growth trends Tree-ring sampling sites	<i>Juniperus occidentalis</i>	California; climatic variation; CO2 fertilization; dendrochronology; increasing CO2; Juniperus occidentalis; Pinus balfouriana; Pinus murrayana	<b>M</b>	D	yes	(+)	(+)	-1	Ψ
6	(Graumlich, 1991)	4,809	Φεβ-91	232	southern Sierra Nevada.	Comparisons of growth trends Tree-ring sampling sites	<i>Pinus murrayana</i>	California; climatic variation; CO2 fertilization; dendrochronology; increasing CO2; Juniperus occidentalis; Pinus balfouriana; Pinus murrayana	<b>M</b>	D	yes	(+)	(+)	0	Ψ
7	(Bert, 1992)	Thesis	1992	15	France, S, Jura Mountains		Abies alba	Écologie végétale Dendrochronologie Sapin pectiné -- Effets du climat-Sapin	<b>A</b>	B	yes	(+)	(+)	-1	E
8	(West et al., 1993)	1,827	1993	38	USA, Georgia		Pinus palustris +	atmospheric carbon-dioxide isiquidambar-stryraciflua	<b>A</b>	A	yes 30°49'39.46"B	(+)	(+)	0	E
9	(Graybill and Idso, 1993)	4,65	Μαρ-93	71	Semiarid, high elevations western NA	Comparisons of growth	Pinus flexilis		<b>A</b>	D	yes	(+)	(+)	0	Ψ

9	(Graybill and Idso, 1993)	4,65	Μαρ-93	71	Semi-arid, high elevations western NA	Comparisons of growth	Pinus aristata +		<b>A</b>	D	yes	(+)	(+)	0	Ψ
9	(Graybill and Idso, 1993)	4,65	Μαρ-93	71	Semi-arid, high elevations western NA	Comparisons of growth	Pinus longaeva +		<b>A</b>	D	yes	(+)	(+)	0	Ψ
9	(Graybill and Idso, 1993)	4,65	Μαρ-93	71	Semi-arid, high elevations western NA	Comparisons of growth	Pinus balfouriana		<b>A</b>	D	yes	(+)	(+)	-1	Ψ
10	(Becker, Nieminen and Geremia, 1994)	1,441	24/1/1994	40	France, NE +		Quercus petraea	Quercus robur / Quercus petraea I France / tree growth I dendrochronology I dendroecology / climate I precipitation I temperature I C 20 I global change	<b>A</b>	A	48°45'N, 6°20'E	(+)	(+)	0	E
10	(Becker, Nieminen and Geremia, 1994)	1,441	24/1/1994	40	France, NE +		Quercus robur +	Quercus robur / Quercus petraea I France / tree growth I dendrochronology I dendroecology / climate I precipitation I temperature I C 20 I global change	<b>A</b>	A	48°45'N, 6°20'E	(+)	(+)	0	E
10	(Becker, Nieminen and Geremia, 1994)	1,441	24/1/1994	40	France, NE +		Fagus sylvatica	Quercus robur / Quercus petraea I France / tree growth I dendrochronology I dendroecology / climate I precipitation I temperature I C 20 I global change	<b>A</b>	A	48°45'N, 6°20'E	(+)	(+)	0	E
11	(Nicolussi, Bortenschlager and Körner, 1995)	1,842	18/1/1994	94	Austria, Alps	Direct measurement-Age classes	Pinus cembra -	Alps; Altitude; Carbon dioxide; Climate change; Dendrochronology	<b>M</b>	C	yes	(+)	(+)	0	Ψ
12	(Picard, 1995)	2,101	18/2/1995	26	France, NE Vosges	(Becker, 1989b) growth trend curve average	Fagus sylvatica	Vosges; années caractéristiques; beech; croissance radiale; dendrochronologie; dendrochronology; dendroecology; dendroécologie; hêtre; pointer years; radial growth	<b>A</b>	A	(+)	(+)	(+)	0	E

13	(Lebourgeois and Becker, 1996)	1,441	1996	8	France, NW, pays de la Loire		Pinus nigra	ABIES-ALBA MILL; CLIMATE; FORESTS; MOUNTAINS; PAST VITALITY; Pines nigra; TRENDS; VOSGES; climate; decline; dendrochronology; earlywood; growth trend; latewood; radial growth	<b>A</b>	A	yes	(+)	(+)	2	≡
14	(Knapp and Soulé, 1996)	2,756	1996	50	central Oregon	laboratory and controlled field experiments	sagebrush-steppe, Artemisia tridentata	CO2 enrichment, central Oregon, sagebrush-steppe, vegetation change.	<b>A</b>	B	yes	(+)	(+)	0	E
15	(Rathgeber <i>et al.</i> , 1999)	2,101	27/10/1998	32	France, S		Quercus humilis +	global change / CO <sub>2</sub> / productivity / Mediterranean area / Quercus humilis	<b>A</b>	B	yes	(+)	0	1	E
16	(Rolland, Petitcolas and Michalet, 1998)	1,842	4/5/1998	27	France, Alps		Picea abies +	Global change · Timberline · Dendroclimatology · Tree-ring · Conifers&bdy:	<b>A</b>	C	yes	(+)	0	-2	ψ
16	(Rolland, Petitcolas and Michalet, 1998)	1,842	4/5/1998	27	France, Alps		Larix decidua	Global change · Timberline · Dendroclimatology · Tree-ring · Conifers&bdy:	<b>A</b>	C	yes	(+)	0	-1	ψ
16	(Rolland, Petitcolas and Michalet, 1998)	1,842	4/5/1998	27	France, Alps		Pinus cembra +	Global change · Timberline · Dendroclimatology · Tree-ring · Conifers&bdy:	<b>A</b>	C	yes	(+)	0	-1	ψ
16	(Rolland, Petitcolas and Michalet, 1998)	1,842	4/5/1998	27	France, Alps		Pinus uncinata +	Global change · Timberline · Dendroclimatology · Tree-ring · Conifers&bdy:	<b>A</b>	C	yes	(+)	0	-1	ψ

17	(Tognetti, Cherubini and Innes, 2000)	7,33	14/12/1999	118	Tuscany, Italy	two-sided t-test to assess if there was a difference between the radial growth at the CO2-enriched site and the control site	Arbutus unedo (strawberry tree), (No- or +)	Arbutus unedo (strawberry tree), Fraxinus ornus, Quercus cerris, Quercus ilex, Quercus pubescens carbon sequestration, dendroecology, Mediterranean trees, natural CO2 springs, Quercus ilex (holm oak), tree rings, water stress.	<b>M</b>	A	yes	(+)	(+)	0	Ξ
18	(Naidu and Delucia, 1999)	8,502	6/11/1999	28	North Carolina	FACE (Free-Air CO2 Enrichment) system, CO2 treatment	Pinus taeda +	climate change, elevated-CO2, growth, Pinus taeda, understory trees	<b>A</b>	A	35.97 N, 79.09 W	(+)	(+)	2	Ξ
19	(Knapp <i>et al.</i> , 2001)	8,502	21/3/2002	108	Arid Oregon	Detecting trends in residuals	western juniper Juniperus occidentalis +	Atmospheric CO2 enrichment; Climate-growth responses; Western juniper	<b>A</b>	B	yes	(+)	(+)	1	E
20	(Hättenschwiler <i>et al.</i> , 1997)	8,502	30/10/2003	221	Semi-arid, CO2 springs Mediterranean, Italy	Growth comparisons with CO2 data	Quercus ilex +	basal area, dendrochronology, forest regeneration, Mediterranean forests, natural CO2 springs, Quercus ilex, tree ring, water relations	<b>A</b>	B	43°17'9N 11°36'9E	(+)	(+)	1	E
21	(Korner, 2005)	N/A	26/8/2005	528	Switzerland	FACE	Tilia platyphyllos	N/A	<b>M</b>	B	yes	(+)	(+)	0	E
21	(Korner, 2005)	N/A	26/8/2005	528	Switzerland	FACE	Quercus petraea	N/A	<b>M</b>	B	yes	(+)	(+)	0	E
21	(Korner, 2005)	N/A	26/8/2005	528	Switzerland	FACE	Fagus sylvatica	N/A	<b>M</b>	B	yes	(+)	(+)	0	E
21	(Korner, 2005)	N/A	26/8/2005	528	Switzerland	FACE	Prunus avium	N/A	<b>M</b>	B	yes	(+)	(+)	0	E
21	(Korner, 2005)	N/A	26/8/2005	528	Switzerland	FACE	Carpinus betulus	N/A	<b>M</b>	B	yes	(+)	(+)	0	E
21	(Korner, 2005)	N/A	26/8/2005	528	Switzerland	FACE	Acer campestre	N/A	<b>M</b>	B	yes	(+)	(+)	0	E
22	(Soulé and Knapp, 2006)	7,33	9/5/2006	82	Arid Oregon	Comparisons with drought years	Pinus ponderosa +	CO2 fertilization, ponderosa pine (Pinus ponderosa), site harshness, drought, interior Pacific Northwest.	<b>A</b>	C	yes	(+)	(+)	1	Ψ

23	(Wang <i>et al.</i> , 2006)	8,502	17/1/2006	48	Dry environment, southwestern Manitoba	Comparisons between young trees and old trees +	Picea glauca +	Dendrochronology; Global change; Picea glauca; Tree ring	<b>A</b>	A	49°40'N, 99°15'W	(+)	(+)	0	≡
24	(Voelker <i>et al.</i> , 2006)	8,759	14/3/2006	50	Ozark Mountains in Missouri	Using geographic information system software	Quercus velutina Lam.	CO2; Pinus echinata; Quercus coccinea; Quercus velutina; carbon dioxide; climate change; dendrochronology; red oak; segment length curve; shortleaf pine	<b>A</b>	B	37N, 91W	(+)	(+)	0	E
24	(Voelker <i>et al.</i> , 2006)	8,759	14/3/2006	50	Ozark Mountains in Missouri	Using geographic information system software	Quercus coccinea Muench	CO2; Pinus echinata; Quercus coccinea; Quercus velutina; carbon dioxide; climate change; dendrochronology; red oak; segment length curve; shortleaf pine	<b>A</b>	B	37N, 91W	(+)	(+)	0	E
24	(Voelker <i>et al.</i> , 2006)	8,759	14/3/2006	50	Ozark Mountains in Missouri	Using geographic information system software	Pinus echinata Mill	CO2; Pinus echinata; Quercus coccinea; Quercus velutina; carbon dioxide; climate change; dendrochronology; red oak; segment length curve; shortleaf pine	<b>A</b>	B	37N, 91W	(+)	(+)	1	E
25	(von Felten <i>et al.</i> , 2007)	1,842	11/1/2007	48	Switzerland	FACE	Larix decidua L.	Elevated CO2 _ Larix decidua _ Pinus uncinata	<b>A</b>	C	9°52'E/46°46'N	(+)	(+)	-1	ψ
25	(von Felten <i>et al.</i> , 2007)	1,842	11/1/2007	48	Switzerland	FACE	Pinus uncinata	Elevated CO2 _ Larix decidua _ Pinus uncinata	<b>A</b>	C	9°52'E/46°46'N	(+)	(+)	1	ψ
26	(Koutavas, 2008)	2,107	14/6/2007	31	island of Kefhalonia in the Ionian Sea	Measurements of cores were conducted from 11 living and one dead firs at four sites	Abies cephalonica or greek fir	CO2 fertilization; Cephalonia Island; Tree rings; Greek fir; Abies cephalonica	<b>A</b>	C	yes	(+)	(+)	0	ψ

27	(Martínez-Vilalta <i>et al.</i> , 2008)	8,02	30/5/2008	160	Spain NE, Catalonia, North East	Pinus Sylvestris	Basal area increment (BAI); CO2 fertilization; Climate change; Climate-growth responses; Dendroecology; Drought; Pinus sylvestris (Scots pine); Tree growth; Tree rings; Water availability	<b>A</b>	B	yes	(+)	(-)	-2	E
28	(Vila <i>et al.</i> , 2008)	2,101	7/3/2008	20	France, SE	Pinus sylvestris -/+	global change bioclimatic limit radial growth Pinus halepensis Pinus sylvestris	<b>M</b>	B	yes	(+)	0	-1	E
28	(Vila <i>et al.</i> , 2008)	2,101	7/3/2008	20	France, SE	Pinus halepensis +	global change bioclimatic limit radial growth Pinus halepensis Pinus sylvestris	<b>A</b>	B	yes	(+)	0	2	E
29	(Cole <i>et al.</i> , 2010)		22/10/2009	44	USA, Wisconsin	Populus tremuloides +	CO2 fertilization; Climate change; Heterozygosity-fitness correlation; Northern hardwood forests; Tree-rings	<b>A</b>	A	yes	(+)	(+)	-2	≡
30	(Rozendaal <i>et al.</i> , 2010)	7,33	3/12/2009	34	South Bolivia Los Indios, La Chonta and Purisima	Cedrelinga catenaeformis -	Bolivia; Climate change; Historical growth increase; Long-term tree growth; Tree ring analysis; Tropical forest	<b>A</b>	A	10°26'S, 65°33'W, 10°26'S, 65°33'W, 11°24'S, 68°43'W	(+)	(+)	-2	≡
30	(Rozendaal <i>et al.</i> , 2010)	7,33	3/12/2009	34	South Bolivia Los Indios, La Chonta and Purisima	Clarisia racemosa +	Bolivia; Climate change; Historical growth increase; Long-term tree growth; Tree ring analysis; Tropical forest	<b>A</b>	A	10°26'S, 65°33'W, 10°26'S, 65°33'W, 11°24'S, 68°43'W	(+)	(+)	-2	≡
30	(Rozendaal <i>et al.</i> , 2010)	7,33	3/12/2009	34	South Bolivia Los Indios, La Chonta and Purisima	Pseudolmedia laevis +	Bolivia; Climate change; Historical growth increase; Long-term tree growth; Tree ring analysis; Tropical forest	<b>A</b>	A	10°26'S, 65°33'W, 10°26'S, 65°33'W, 11°24'S, 68°43'W	(+)	(+)	-2	≡
30	(Rozendaal <i>et al.</i> , 2010)	7,33	3/12/2009	34	South Bolivia Los Indios, La Chonta and Purisima	Cedrela odorata +	Bolivia; Climate change; Historical growth increase; Long-term tree growth; Tree ring analysis; Tropical forest	<b>A</b>	A	10°26'S, 65°33'W, 10°26'S, 65°33'W, 11°24'S, 68°43'W	(+)	(+)	-1	≡

30	(Rozendaal <i>et al.</i> , 2010)	7,33	3/12/2009	34	South Bolivia Los Indios, La Chonta and Purísima		Peltogyne heterphylla +	Bolivia; Climate change; Historical growth increase; Long-term tree growth; Tree ring analysis; Tropical forest	<b>A</b>	A	10°26'S, 65°33'W, 10°26'S, 65°33'W, 11°24'S, 68°43'W	(+)	(+)	0	Ξ
31	(Zuidema, Vlam and Chien, 2011)	1,842	Φεβ-11	21	Vietnam		Pinus kwangtungensis /+	Autocorrelated growth; Dendroecology; Juvenile selection effect; Threatened species; Tree age; Vietnam	<b>A</b>	B	21°N,105°E/ 21°N,105° E/ 16°N,107°E / 20°N,104°E	(+)	0	-2	E
31	(Zuidema, Vlam and Chien, 2011)	1,842	Φεβ-11	21	Vietnam		Annamocarya sinensis -	Autocorrelated growth; Dendroecology; Juvenile selection effect; Threatened species; Tree age; Vietnam	<b>A</b>	B	21°N,105°E/ 21°N,105° E/ 16°N,107°E / 20°N,104°E	(+)	0	-2	E
31	(Zuidema, Vlam and Chien, 2011)	1,842	Φεβ-11	21	Vietnam		Calocedrus macrolepis	Autocorrelated growth; Dendroecology; Juvenile selection effect; Threatened species; Tree age; Vietnam	<b>A</b>	B	21°N,105°E/ 21°N,105° E/ 16°N,107°E / 20°N,104°E	(+)	0	1	E
31	(Zuidema, Vlam and Chien, 2011)	1,842	Φεβ-11	21	Vietnam		Dacrydium elatum -	Autocorrelated growth; Dendroecology; Juvenile selection effect; Threatened species; Tree age; Vietnam	<b>A</b>	B	21°N,105°E/ 21°N,105° E/ 16°N,107°E / 20°N,104°E	(+)	0	0	E
32	(Girardin <i>et al.</i> , 2011)	3,44	4/2/2011	31	Provincial Forest in Manitoba, Canada	model is used to simulate high-freq uency responses to climate variabilit y TGI	Pinus banksiana	N/A	<b>M</b>	B	51° 40' N, 100° 55' W	(+)	(+)	0	E
33	(Koutavas, 2013)	8,502	20/9/2012	26	Kefalonia Greece	]’, 021	Abies cephalonica or greek fir	Ainos, Cephalonia, CO2 fertilization, drought, Greece, Greek fir, growth-climate relationships, Abies cephalonica, Mediterranean, water-use efficiency	<b>A</b>	C	ainos mountain	(+)	(+)	0	Ψ

34	(Tegel <i>et al.</i> , 2014)	2,017	27/9/2013	71	Albania and Macedonia	Comparisons of growth	Fagus sylvatica	Albania Balkan Peninsula, Fagus sylvatica L., Macedonia, Tree-ring width,	<b>A</b>	B	yes	(+)	(+)	-2	E
35	(Bader <i>et al.</i> , 2013)		3/4/2013	52	Swiss Canopy Crane (SCC)	FACE	Fagus sylvatica	CO2 fertilization, coupled climate-carbon cycle model, ecosystem carbon cycling, elevated CO2, free-air CO2 enrichment (FACE), global carbon cycle	<b>M</b>	B	yes	(+)	(+)	0	E
35	(Bader <i>et al.</i> , 2013)		3/4/2013	52	Swiss Canopy Crane (SCC)	FACE	Quercus petraea	CO2 fertilization, coupled climate-carbon cycle model, ecosystem carbon cycling, elevated CO2, free-air CO2 enrichment (FACE), global carbon cycle	<b>M</b>	B	yes	(+)	(+)	0	E
35	(Bader <i>et al.</i> , 2013)		3/4/2013	52	Swiss Canopy Crane (SCC)	FACE	Carpinus betulus	CO2 fertilization, coupled climate-carbon cycle model, ecosystem carbon cycling, elevated CO2, free-air CO2 enrichment (FACE), global carbon cycle	<b>M</b>	B	yes	(+)	(+)	0	E
35	(Bader <i>et al.</i> , 2013)		3/4/2013	52	Swiss Canopy Crane (SCC)	FACE	Tilia platyphyllos	CO2 fertilization, coupled climate-carbon cycle model, ecosystem carbon cycling, elevated CO2, free-air CO2 enrichment (FACE), global carbon cycle	<b>M</b>	B	yes	(+)	(+)	0	E
35	(Bader <i>et al.</i> , 2013)		3/4/2013	52	Swiss Canopy Crane (SCC)	FACE	Acer campestre	CO2 fertilization, coupled climate-carbon cycle model, ecosystem carbon cycling, elevated CO2, free-air CO2 enrichment (FACE), global carbon cycle	<b>M</b>	B	yes	(+)	(+)	0	E

35	(Bader <i>et al.</i> , 2013)		3/4/2013	52	Swiss Canopy Crane (SCC)	FACE	Prunus avium	CO2 fertilization, coupled climate-carbon cycle model, ecosystem carbon cycling, elevated CO2, free-air CO2 enrichment (FACE), global carbon cycle	<b>M</b>	B	yes	(+)	(+)	0	E
36	(Waterhouse <i>et al.</i> , 2004)	4,571	13/6/2013	122	northern Europe: northwest Norfolk, south Bedfordshire southwest Finland	calculate values of intrinsic water-use efficiency (IWUE) and intercellular CO2 concentrations	Pinus sylvestris +	Atmosphere; Carbon dioxide; Carbon isotope ratios; Fagus sylvatica; Intrinsic water-use efficiency; Pinus sylvestris; Quercus robur; Trees	<b>A</b>	A	yes	(+)	(+)	0	E
36	(Waterhouse <i>et al.</i> , 2004)	4,571	13/6/2013	122	northern Europe: northwest Norfolk, south Bedfordshire southwest Finland	calculate values of intrinsic water-use efficiency (IWUE) and intercellular CO2 concentrations	Quercus robur	Atmosphere; Carbon dioxide; Carbon isotope ratios; Fagus sylvatica; Intrinsic water-use efficiency; Pinus sylvestris; Quercus robur; Trees	<b>A</b>	A	yes	(+)	(+)	0	E
36	(Waterhouse <i>et al.</i> , 2004)	4,571	13/6/2013	122	northern Europe: northwest Norfolk, south Bedfordshire southwest Finland	calculate values of intrinsic water-use efficiency (IWUE) and intercellular CO2 concentrations	Fagus sylvatica	Atmosphere; Carbon dioxide; Carbon isotope ratios; Fagus sylvatica; Intrinsic water-use efficiency; Pinus sylvestris; Quercus robur; Trees	<b>A</b>	A	yes	(+)	(+)	1	Ψ
37	(Li <i>et al.</i> , 2014)	2,23	4/12//2014	25	Changbai Mountains In northeastern China	light-use efficiency model	Pinus koraiensis +, no changes	N/A	<b>M</b>	B	yes	(+)	0	0	E
38	(Camarero, Gazol, Galván, <i>et al.</i> , 2015)	8,502	31/10/2014	27	Pyrenees		Pinus uncinata	Basal area increment; Climate warming; Dendroecology; Generalized additive mixed models; Pinus uncinata; Subalpine forests	<b>M</b>	C	yes	(+)	0	-2	Ψ

39	(Camarero, Gazol, Tardif, <i>et al.</i> , 2015)	4.248	1/9/2015	24	Iberian Range, Spain, Aragon,	Field sampling & Measurements	Pinus sylvestris+	basal area increment, CO2-fertilization effect, dendroecology, drought, Generalized Additive Models, Mediterranean pines, <i>Pinus</i> , Spain, water balance.	<b>M</b>	C	aragon, spain	(+)	(-)	-2	Ψ
39	(Camarero, Gazol, Tardif, <i>et al.</i> , 2015)	4.248	1/9/2015	24	Iberian Range, Spain, Aragon,	Field sampling & Measurements	Pinus uncinata -	basal area increment, CO2-fertilization effect, dendroecology, drought, Generalized Additive Models, Mediterranean pines, <i>Pinus</i> , Spain, water balance.	<b>M</b>	C	aragon, spain	(+)	(-)	-2	Ψ
39	(Camarero, Gazol, Tardif, <i>et al.</i> , 2015)	4.248	1/9/2015	24	Iberian Range, Spain, Aragon,	Field sampling & Measurements	Pinus nigra-	basal area increment, CO2-fertilization effect, dendroecology, drought, Generalized Additive Models, Mediterranean pines, <i>Pinus</i> , Spain, water balance.	<b>M</b>	C	aragon, spain	(+)	(-)	0	Ψ
39	(Camarero, Gazol, Tardif, <i>et al.</i> , 2015)	4.248	1/9/2015	24	Iberian Range, Spain, Aragon,	Field sampling & Measurements	Pinus Pinaster-	basal area increment, CO2-fertilization effect, dendroecology, drought, Generalized Additive Models, Mediterranean pines, <i>Pinus</i> , Spain, water balance.	<b>M</b>	C	aragon, spain	(+)	(-)	0	Ψ
39	(Camarero, Gazol, Tardif, <i>et al.</i> , 2015)	4.248	1/9/2015	24	Iberian Range, Spain, Aragon,	Field sampling & Measurements	Pinus halepensis	basal area increment, CO2-fertilization effect, dendroecology, drought, Generalized Additive Models, Mediterranean pines, <i>Pinus</i> , Spain, water balance.	<b>M</b>	C	aragon, spain	(+)	(-)	1	Ψ
40	(Li, Harrison and Prentice, 2016)	2,363	23/3/2015	3	Great Western Woodlands, Western Australia	Tree-Growth simulation comparisons with CO2 data	gymnosperm Callitris columellaris	CO2 fertilisation; Carbon allocation; Response to climate change; Tree growth modelling; Tree rings; Water-use efficiency	<b>A</b>	A	30.1°S, 120.7°E	(+)	(+)	-2	Ξ

41	(Battipaglia <i>et al.</i> , 2015)	2,806	25/3/2015	14	Central Africa	Measurements of cross sections for individual trees	Entandrophragma cylindricum Sprague	Trees, Carbon dioxide, Dendrology, Root growth, Rain Carbon sequestration, Climate change	<b>M</b>	A	yes	(+)	(+)	0	€
41	(Battipaglia <i>et al.</i> , 2015)	2,806	25/3/2015	14	Central Africa	Measurements of cross sections for individual trees	Triplochiton scleroxylon K. Schum.	Trees, Carbon dioxide, Dendrology, Root growth, Rain Carbon sequestration, Climate change	<b>M</b>	A	yes	(+)	(+)	-1	€
41	(Battipaglia <i>et al.</i> , 2015)	2,806	25/3/2015	14	Central Africa	Measurements of cross sections for individual trees	Erythrophloeum ivorense A.Chev.	Trees, Carbon dioxide, Dendrology, Root growth, Rain Carbon sequestration, Climate change	<b>M</b>	A	yes	(+)	(+)	0	€

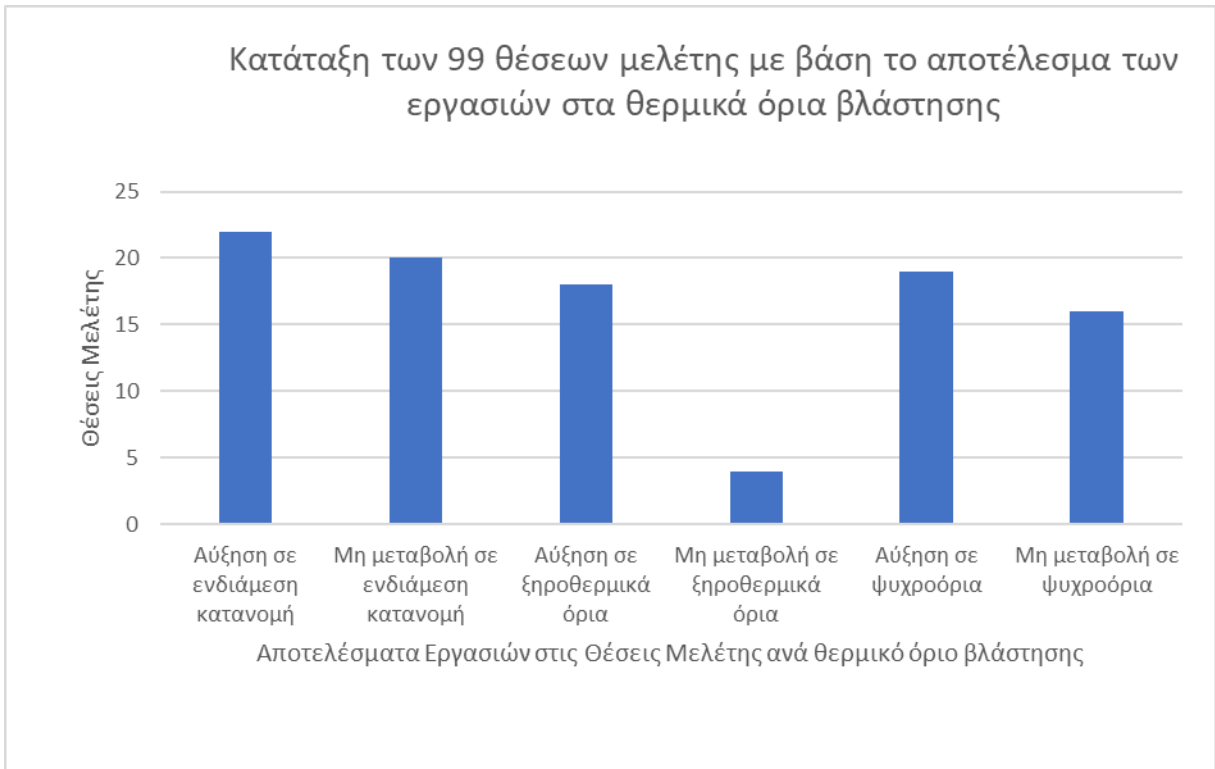
Για να διερευνηθεί ο περιοριστικός παράγοντας στη θέση μελέτης των εργασιών έγινε ταξινόμηση του πιο πάνω πίνακα ως προς ξηροθερμικά όρια βλάστησης σε σχέση με το υψόμετρο της θέσης μελέτης και τα αποτελέσματα όπου προέκυψε ο πίνακας 4.7.

Στον πίνακα 4.7. καταγράφεται το αποτέλεσμα των εργασιών σε σχέση με τα θερμικά όρια της βλάστησης ανά θέση μελέτης καθώς και η τάση των κατακρημνίσεων και της θερμοκρασίας στις σημεία αυτά.

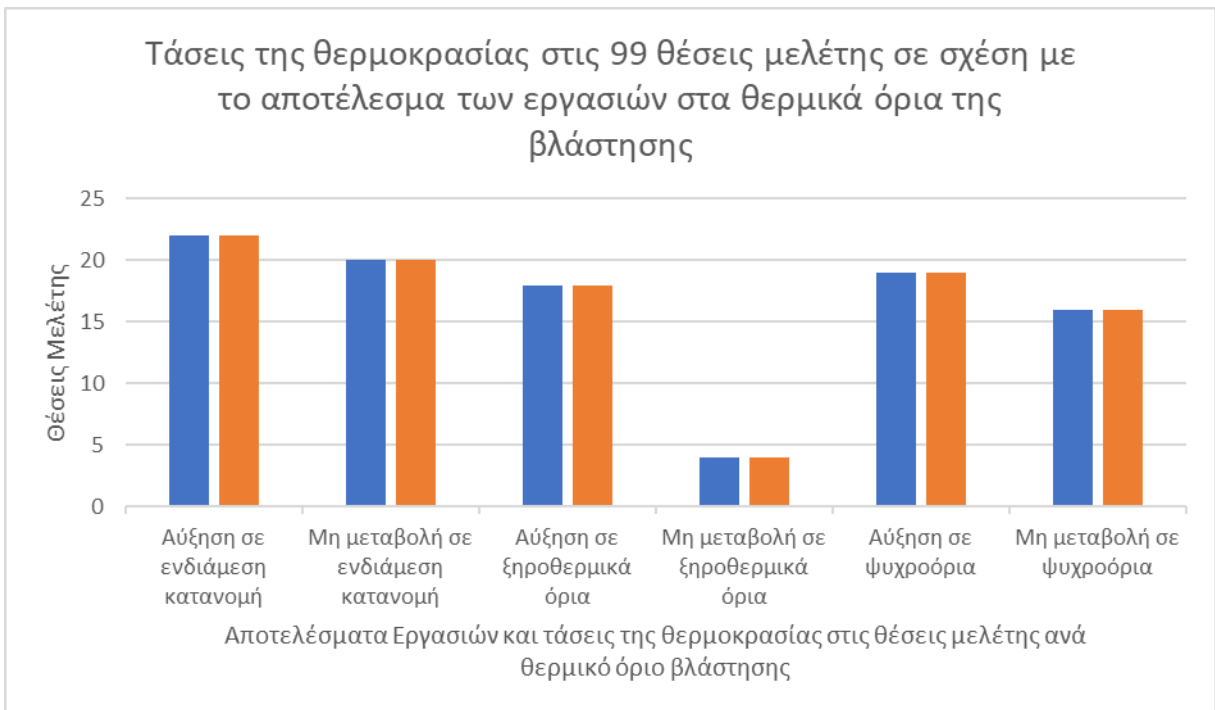
**Πίνακας 4.7.** Τάσεις θερμοκρασίας και κατακρημνίσεων στις θέσεις μελέτης των εργασιών στα θερμικά όρια βλάστησης των ειδών.

	Αύξηση σε ενδιάμεση κατανομή	Μη μεταβολή ή σε ενδιάμεση κατανομή	Αύξηση σε ξηροθερμικά όρια	Μη μεταβολή ή σε ξηροθερμικά όρια	Αύξηση σε ψυχρόροια	Μη μεταβολή ή σε ψυχρόροια
Αριθμός θέσεων μελέτης	22	20	18	4	19	16
Αύξηση κατακρημνίσεων	16	15	18	4	15	9
Μείωση κατακρημνίσεων	1	2	0	0	0	6
Μη αλλαγή κατακρημνίσεων	5	3	0	0	4	1
Αύξηση θερμοκρασίας	22	20	18	4	19	16

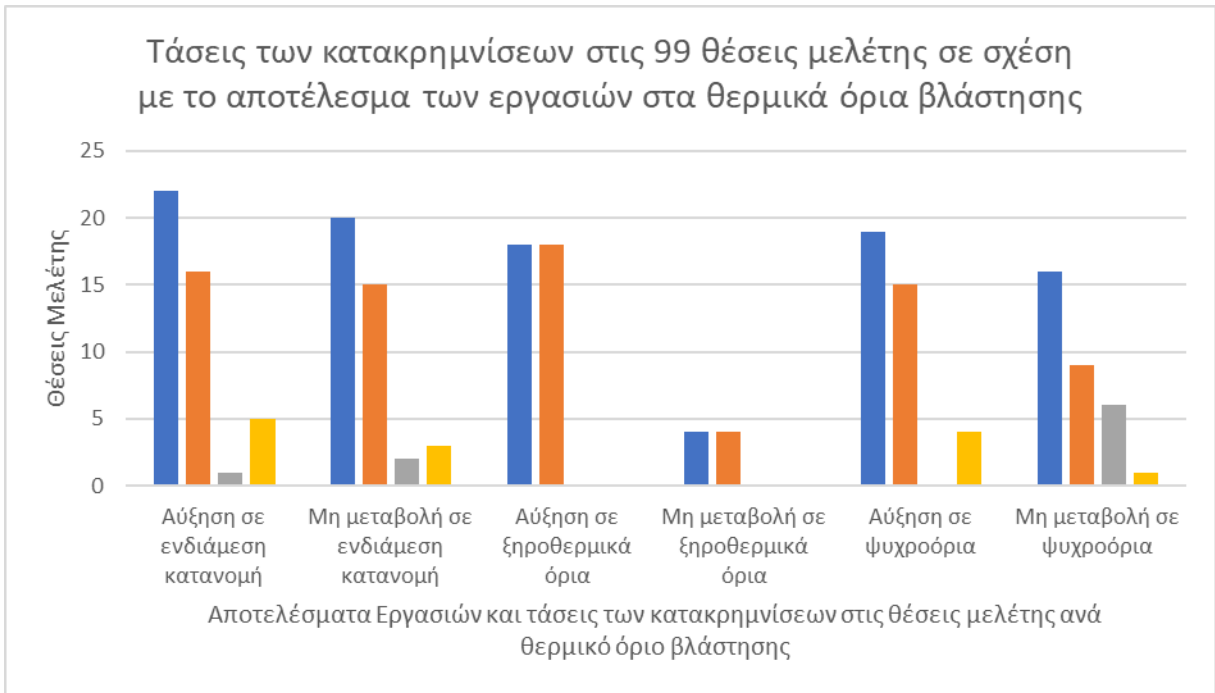
Τα ευρήματα του πίνακα 4.7 καταγράφονται και στα διαγράμματα 4.1, 4.2 και 4.3.



**Διάγραμμα 4.1.** Κατάταξη των 99 θέσεων μελέτης των εργασιών σε σχέση με το αποτέλεσμα και τα θερμικά όρια βλάστησης των ειδών.



**Διάγραμμα 4.2.** Καταγραφή της τάσης αύξησης της θερμοκρασίας στις θέσεις μελέτης των εργασιών και σε σχέση με το αποτέλεσμα τους στα θερμικά όρια βλάστησης των ειδών. Με μπλε χρώμα είναι οι θέσεις μελέτης και με πορτοκαλί η αύξηση της θερμοκρασίας.



**Διάγραμμα 4.3.** Καταγραφή των τάσεων των κατακρημνίσεων στις θέσεις μελέτης των εργασιών και σε και σε σχέση με το αποτέλεσμα τους στα θερμικά όρια βλάστησης των ειδών. Με μπλε χρώμα είναι ο αριθμός θέσεων μελέτης των εργασιών, με πορτοκαλί η τάση αύξησης των κατακρημνίσεων, με κίτρινο η μη μεταβολή των κατακρημνίσεων και με γκριζό η μείωση των κατακρημνίσεων.

# Κεφάλαιο 5

## 5 Συζήτηση – Συμπεράσματα – Εισηγήσεις

### 5.1 Συζήτηση

Στην παρούσα Μεταπτυχιακή Διατριβή, έγινε βιβλιογραφική ανασκόπηση για να καταγραφούν οι ερευνητικές εργασίες οι οποίες μελέτησαν την επίδραση της αύξησης του ατμοσφαιρικού CO<sub>2</sub> στην παραγωγικότητα των δασών. Έχει καταγράψει κατά πόσο η επίδραση της αύξησης του CO<sub>2</sub> σύμφωνα με τις εργασίες ήταν θετική ή αρνητική στην συγκεκριμένη βλάστηση που είχε μελετηθεί. Οι εργασίες οι οποίες έχουν εντοπιστεί έχουν καταγραφεί με χρονολογική σειρά.

Έγινε καταγραφή των εργασιών που έχουν ευρεθεί με τη χρήση των λέξεων κλειδιών CO<sub>2</sub>, fertilization, water use efficiency (WUE), productivity, growth, drought, forest. Κατά την εύρεση τους οι λέξεις κλειδιά έχουν χρησιμοποιηθεί είτε όλες μαζί ή συνδυασμός αυτών ή μόνες τους. Όμως στον πίνακα 4.1. καταγράφονται οι λέξεις κλειδιά που έδιναν οι εργασίες μετά την αναζήτηση τους.

Εκ πρώτης όψεως από την ανάγνωση των αποτελεσμάτων των εργασιών όπως φαίνονται στον πίνακα 4.1., χωρίς να επέλθει ανάλυση, διαφαίνεται ότι η άνοδος των ατμοσφαιρικών εκπομπών CO<sub>2</sub> έχει θετική επίδραση στην αύξηση των δέντρων, εξαιτίας της αυξανόμενης διαθεσιμότητας του άνθρακα στην ατμόσφαιρα. Έχουν γίνει εκτενώς πολλές έρευνες, πειράματα εμπλουτισμού CO<sub>2</sub> σε ελεγχόμενο περιβάλλον, πολλές εμπειρικές δέντρο-χρονολογικές μελέτες σε πεδίο καθώς επίσης και προβλέψεις επί του ζητήματος με τη χρήση μοντέλων. Η ανάλυση των δακτυλίων των δέντρων έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως για να ανιχνεύσει τάσεις αύξησης των δέντρων τόσο στην Αρκτική και εύκρατες περιοχές αλλά και σε άλλες περιοχές του πλανήτη όπως στην

Ευρώπη και στη Μεσόγειο (Bowman et al., 2013). Αποτελεί τον πιο συχνό τρόπο μελέτης της παραγωγής των δέντρων στις εργασίες που αναλύθηκαν.

Στην πλειοψηφία τους οι έρευνες που έχουν εντοπιστεί στην παρούσα Μεταπτυχιακή διατριβή που αφορούν τη μελέτη εμπλουτισμού CO<sub>2</sub>, έδειξαν θετικά αποτελέσματα στην αύξηση των δέντρων σε αυξημένο CO<sub>2</sub>, συνδέοντας ταυτόχρονα τα ευρήματα τους με την ενίσχυση και ισχυροποίηση των άμεσων αποτελεσμάτων με λίπανση CO<sub>2</sub> (αυξημένη φωτοσύνθεση, αποτελεσματικότητα στην χρήση νερού, πάνω και κάτω από το έδαφος ανάπτυξη) και επιτρέποντας έτσι την επιβεβαίωση και κατηγοριοποίηση κάποιων οικοσυστημάτων ότι μπορεί να είναι πιο δεκτικά σε CO<sub>2</sub>.

Τα στοιχεία τα οποία παραθέτουν οι εργασίες που καταλήγουν σε θετική επίδραση του CO<sub>2</sub> στην αύξηση των δέντρων αφορούν την ευρεθείσα αύξηση της παραγωγικότητας των δασών. Αύξηση όμως η οποία αποδίδεται σε πολλές περιπτώσεις στο CO<sub>2</sub> διότι είτε δεν μπορεί να αποδοθεί στη θερμοκρασία και στις κατακρημνίσεις είτε άλλοτε αυτοί οι παράγοντες δεν εξετάζονται διεξοδικά. Όμως η διαδικασία αύξησης των δέντρων εξαρτάται από πολλούς παράγοντες το φως, τη πυκνότητα της βλάστησης, το είδος των κατακρημνίσεων και την κατανομή τους, τον προσανατολισμό, την ηλικία του πληθυσμού, τη θέση του πληθυσμού στη γεωγραφική κατανομή του είδους ως προς το γεωγραφικό πλάτος και το υψόμετρο, τη γονιμότητα του εδάφους ακόμη και από τον εξειδικευμένο μηχανισμό φωτοσύνθεσης για κάθε είδος βλάστησης.

Από τις εργασίες που καταλήγουν σε αποτελέσματα θετικής επίδρασης οι πιο πάνω παράγοντες λαμβάνονται υπόψη πολύ περιορισμένα. Όπου οι παράγοντες της θερμοκρασίας και των κατακρημνίσεων λαμβάνονται υπόψη και μελετώνται δεν συσχετίζονται με άλλες παραμέτρους. Στις εργασίες αυτές δεν διαφαίνεται να έχουν ληφθεί υπόψη οι εποχικές διακυμάνσεις της θερμοκρασίας και των κατακρημνίσεων που έχει ευρεθεί στη παρούσα διατριβή ότι σε κάποιες περιοχές παρουσιάζεται αύξηση των κατακρημνίσεων ακόμη και το καλοκαίρι (εικόνες 4.2. και 4.4.). Σε ελάχιστες δίνονται στοιχεία προσανατολισμού θέσης και ακόμη πιο λίγες σχολιάζουν τη θέση του πληθυσμού που μελετούν στη γεωγραφική κατανομή του είδους.

Κάποιες έρευνες δεικνύουν ότι τα οικοσυστήματα με μέτρια ξηρασία και αρκετή ύπαρξη αζώτου μπορεί να ανταποκρίνονται περισσότερο στο CO<sub>2</sub>. Κάποιες εμπειρικές έρευνες που μελέτησαν τους δακτυλίους των δέντρων κατέληξαν στις ακόλουθες τρεις απόψεις

σχετικά με την ανίχνευση CO<sub>2</sub> και την επίδραση του στην ανάπτυξη των δακτυλίων των δέντρων αλλά και της βλάστησης εκτενέστερα:

- i. διαπίστωση ενδείξεων για την επίδραση του CO<sub>2</sub> στην αύξηση των δέντρων αλλά και της βλάστησης.
- ii. Απόδοση της αύξησης της βλάστησης γενικότερα στις ευνοϊκές κλιματικές αλλαγές και όχι ειδικά στην επίδραση του CO<sub>2</sub>, και
- iii. η ενίσχυση στην αύξηση των δέντρων πιθανόν να προκληθεί από διάφορους παράγοντες σε συνεργασία όπως η ευνοϊκή κλιματική αλλαγή, η λίπανση με CO<sub>2</sub> και η ανθρωπογενής ατμοσφαιρική εναπόθεση, ιδιαίτερα του αζώτου.

Σε κάποιες από τις μελέτες όπως αυτή των Bader et al. (2013), φάνηκε ότι η αύξηση των δένδρων στο συγκεκριμένο εύκρατο δάσος που έγινε η έρευνα, δεν περιορίζεται από τις τρέχουσες ατμοσφαιρικές συγκεντρώσεις CO<sub>2</sub>, γεγονός που σημαίνει ότι το συγκεκριμένο είδος βλάστησης είναι απίθανο να αυξάνεται γρηγορότερα σε έναν μελλοντικό περιβάλλον με αυξημένο το CO<sub>2</sub>. Για το γεγονός κατά πόσο θα επηρεαστεί η αύξηση των δένδρων, πειραματικά είναι αδύνατο να εξαχθούν συγκεκριμένα συμπεράσματα βασιζόμενα σε μακροπρόθεσμες αλλαγές καθώς οι διαδικασίες που αφορούν τον άνθρακα και το διοξείδιο του άνθρακα στην φύση διαδραματίζονται και ανταποκρίνονται με πολύ αργό ρυθμό (Bugmann and Bigler, 2011).

Σε μελέτη που έγινε από την Graumlich (1991), καταγράφηκαν αρνητικά αποτελέσματα στην αύξηση των δέντρων. Συγκεκριμένα διαφάνηκε ότι μακροπρόθεσμα στοιχεία που αφορούν κωνοφόρα δέντρα στις Άλπεις δεν έχουν επηρεαστεί θετικά από την αύξηση του CO<sub>2</sub>. Παρόμοια ήταν τα αποτελέσματα σε μελέτες που έγιναν από άλλους ερευνητές για άλλα είδη βλάστησης σε διαφορετικές περιοχές όπως των Korner (2005), Nicolussi, Bortenschlager και Körner (1995), Li et al. (2014), Tognetti, Cherubini και Innes (2000).

Στους πίνακες 4.2., 4.3. 4.4. και 4.5. φαίνεται η σχέση των αποτελεσμάτων των εργασιών με τους αριθμούς αναφορών τους. Από την ταξινόμηση που έγινε διαφαίνεται ότι οι εργασίες που δεν δείχνουν επηρεασμό της αύξησης του ατμοσφαιρικού CO<sub>2</sub> με την παραγωγικότητα των δασών έχουν πολύ μεγαλύτερο αριθμό αναφορών σε αντιστοιχία ανά μονάδα σε αντίθεση με τις υπόλοιπες. Παρόλο που στη δεύτερη ταξινόμηση ο λόγος των εργασιών που δεν δείχνουν μεταβολή μειώνεται εντούτοις

παραμένει μεγαλύτερος παρά τη μείωση του ποσοστού των εργασιών αυτών επί του συνόλου.

Το αποτέλεσμα των πιο πάνω ταξινομήσεων δύναται να δεικνύει ότι οι εργασίες που καταλήγουν σε μη επίδραση της αύξησης του ατμοσφαιρικού CO<sub>2</sub> στην παραγωγικότητα των δασών, έχουν μεγαλύτερο αντίκτυπο στην επιστημονική κοινότητα από αυτές που δείχνουν θετική επίδραση. Το γεγονός αυτό θέτει έντονα το σοβαρό προβληματισμό σχετικά με τη βαρύτητα των αποτελεσμάτων των εργασιών που δείχνουν θετική επίδραση που όπως έχει λεχθεί εκ πρώτης όψεως ένεκα της πλειοψηφίας τους δύναται να δώσουν την εντύπωση της ορθότερης και επικρατέστερης προσέγγισης επί του θέματος.

Από τις 55 εργασίες που έχουν μελετηθεί εξαιρέθηκαν 14 από την ανάλυση της διατριβής. Όσες από αυτές είχαν γίνει σε ελεγχόμενο περιβάλλον εμπλουτισμού CO<sub>2</sub> κατέληξαν σε μη επίδραση του στην παραγωγικότητα των δασών, ενώ οι υπόλοιπες χρησιμοποιούσαν μοντέλα για την επεξεργασία δεδομένων σε κάποιες συγκεντρώσεις CO<sub>2</sub> που δεν φαινόταν ο τρόπος προσδιορισμού τους. Οι εργασίες αυτές κρίθηκαν ακατάλληλες για την εξυπηρέτηση του σκοπού της παρούσας διατριβής που είναι και ο εντοπισμός των περιοριστικών παραγόντων στις θέσεις μελέτης των εργασιών. Από τις 41 εργασίες που επιλέγηκαν οι 29 κατέληξαν σε θετική απόκριση και οι 12 σε μη απόκριση του CO<sub>2</sub> στην παραγωγικότητα των δασών. Οι 41 εργασίες έδωσαν 99 θέσεις μελέτης (Πίνακας 4.7.) στις οποίες έχουν μελετηθεί 64 είδη βλάστησης (Πίνακας 4.6.).

Στο διάγραμμα 4.1. φαίνεται ότι στην ενδιάμεση κατανομή και στα ψυχροόρια η διαφορά της αύξησης και της μη επίδρασης είναι μικρή. Το γεγονός αυτό σε συνέργεια με τα δεδομένα των διαγραμμάτων 4.2. και 4.3. δηλαδή της αύξησης της θερμοκρασίας σε όλες τις θέσεις και των κατακρημνίσεων στις πλείστες δύναται να οδηγήσει στο συμπέρασμα ότι στην ενδιάμεση κατανομή η παραγωγικότητα των δασών ευνοήθηκε από τις κλιματικές συνθήκες. Στα ψυχροόρια η ευρεθείσα αύξηση πρωτίστως οφείλεται στην αύξηση του περιοριστικού παράγοντα στις συνθήκες αυτές, δηλαδή της θερμοκρασίας.

Στις εργασίες που μελέτησαν είδη βλάστησης στα ξηροθερμικά όρια τους, στο διάγραμμα 4.1. παρουσιάζεται μεγάλη απόκλιση μεταξύ τους, με υπεροχή αυτών που καταλήγουν σε θετική επίδραση της αύξησης των δέντρων. Όμως εάν εξεταστούν τα δεδομένα των τάσεων της θερμοκρασίας και των κατακρημνίσεων, διαπιστώνεται ότι

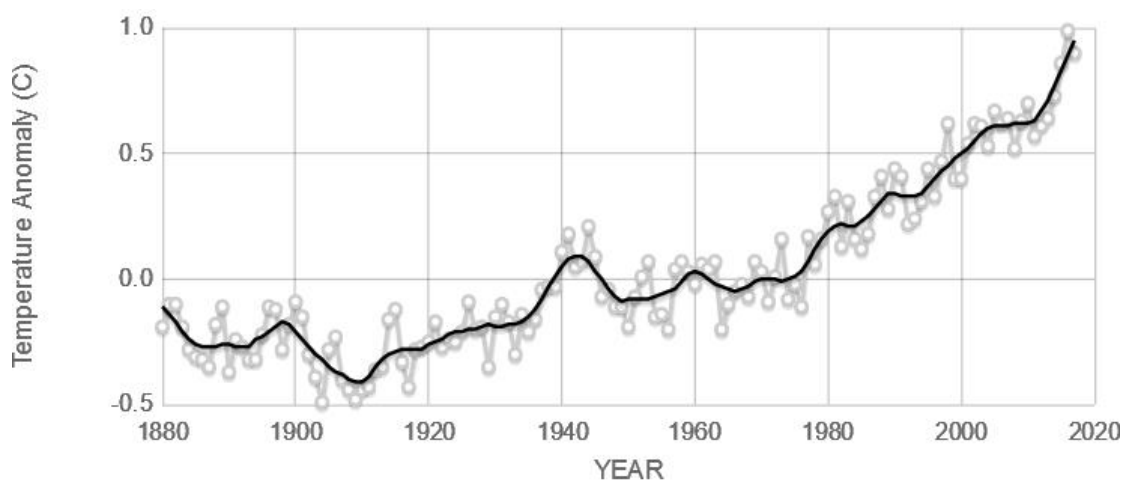
στα σημεία αυτά που κύριος περιοριστικός παράγοντας είναι η υγρασία παρουσιάζεται αύξηση της θερμοκρασίας και των κατακρημνίσεων είτε σε ετήσια βάση είτε σε εποχική κυρίως το καλοκαίρι που έχει ευνοϊκές επιδράσεις στην παραγωγικότητα των δασών. Το δεδομένο αυτό σε συνάρτηση με τα πιο πάνω στα ενδιάμεσα και ψυχροόρια, δίνουν μια διαφορετική ανάγνωση των αποτελεσμάτων των ερευνών.

Παρόλο που χωρίς ανάλυση, τα αποτελέσματα των εργασιών δύναται να δώσουν την εντύπωση ότι η αύξηση της συγκέντρωσης του CO<sub>2</sub> στην ατμόσφαιρα επηρεάζει θετικά την παραγωγικότητα των δασών, εντούτοις η περαιτέρω ανάλυση τους οδηγεί στο συμπέρασμα ότι έχουν μικρότερο αντίκτυπο στην επιστημονική κοινότητα. Επιπλέον από την αναζήτηση των περιοριστικών παραγόντων στις θέσεις μελέτης των εργασιών αυτών δύναται να ειπωθεί ότι, εντοπίζεται αδυναμία στην ερμηνεία της σχέσης της ευρεθείσας αύξησης στην παραγωγικότητα των δασών με τους παράγοντες που δύναται να επηρεάζουν περιοριστικά την αύξηση των δέντρων στις θέσεις μελέτης.

Στις εργασίες μελετήθηκε κατά πόσον υπήρξε αύξηση της παραγωγικότητας των δασών υπό την επίδραση της αύξησης του ατμοσφαιρικού CO<sub>2</sub>. Όπου παρατηρήθηκε αύξηση στην παραγωγικότητα των δασών ερμηνεύτηκε από τους μελετητές ότι οφείλεται στην αύξηση του ατμοσφαιρικού CO<sub>2</sub>. Υπάρχουν όμως και άλλοι παράγοντες που αποτελούν συνέπειες της κλιματικής αλλαγής που πρέπει να ληφθούν υπόψη πριν την παραδοχή ότι η αύξηση της παραγωγικότητας των δασών οφείλεται στη λίπανση από την αυξημένη συγκέντρωση CO<sub>2</sub> στην ατμόσφαιρα. Από την ανάλυση που έγινε στην διατριβή αυτή προέκυψε ότι θερμοκρασία και οι κατακρημνίσεις είναι οι περιοριστικοί παράγοντες στις θέσεις μελέτης στα ψυχροόρια και στα ξηροθεμικά όρια αντίστοιχα. Στα ενδιάμεσα θερμικά όρια βλάστησης η αύξηση τους ευνόησε την παραγωγικότητα των δασών.

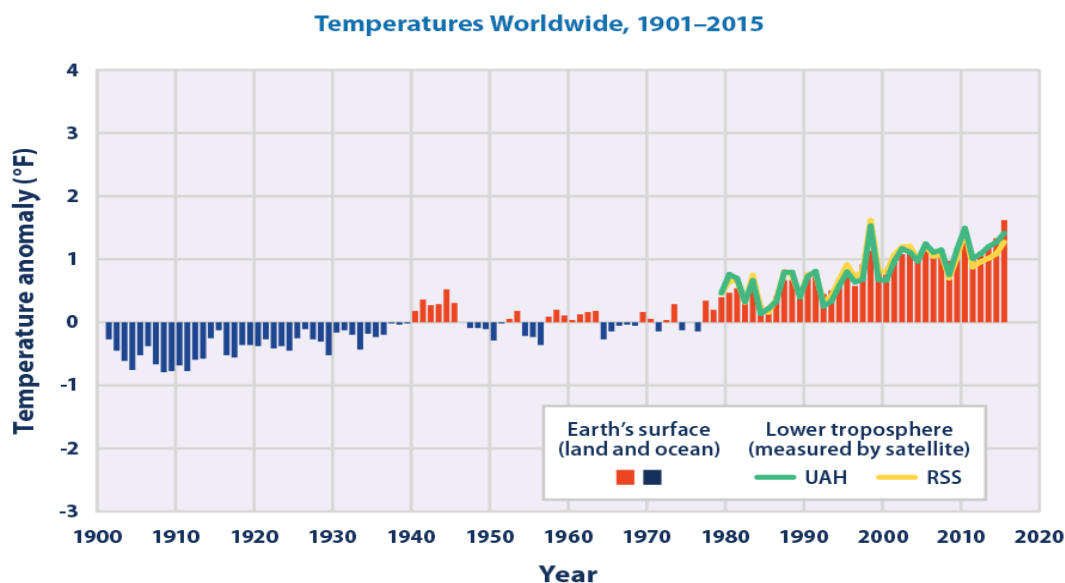
Είναι πλέον δεδομένο και ευρέως αποδεκτό το γεγονός της αύξησης της θερμοκρασίας του πλανήτη κατά 0.9 °C όπως φαίνεται και στα διαγράμματα στις εικόνες 5.1. και 5.2. Αρκετές έρευνες καταλήγουν στο αποτέλεσμα ότι η άνοδος της θερμοκρασίας είναι ένα στοιχείο της παραγωγικότητας της βλάστησης που δύναται από μόνο του να δράσει ουσιαστικά στην αύξηση της (Silveira and Thiebaut, 2017; Ibanez, et al., 2018). Παρόλο που πειραματικά η αύξηση της θερμοκρασίας έχει δείξει μέχρι και 19% αύξησης στην παραγωγικότητα των φυτών χρειάζεται να διερευνηθεί περισσότερο σε πειραματικό στάδιο η απόκριση των χερσαίων οικοσυστημάτων στην άνοδο της θερμοκρασίας

καθώς και να κατανοηθεί η σημασία σχετικών παραγόντων όπως η υγρασία, η ποιότητα της τοποθεσίας, ο τύπος της βλάστησης και το ιστορικό της χρήσης γης (Rustad, et al., 2001).



Source: climate.nasa.gov

**Εικόνα 5.1. :** Παγκόσμια αύξηση της θερμοκρασίας (NASA, 2018).



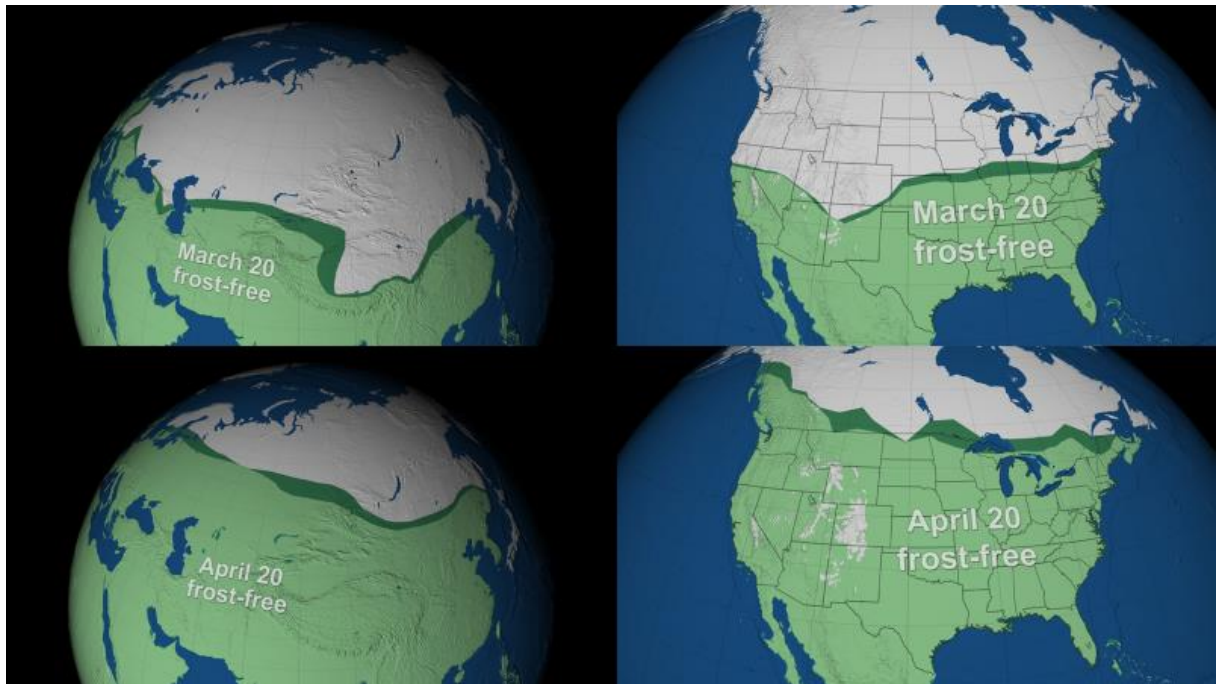
Data source: NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration). 2016. National Centers for Environmental Information. Accessed February 2016. [www.ncei.noaa.gov](http://www.ncei.noaa.gov).

For more information, visit U.S. EPA's "Climate Change Indicators in the United States" at [www.epa.gov/climate-indicators](http://www.epa.gov/climate-indicators).

**Εικόνα 5.2.:** Οι διαφορές των ετήσιων μέσων θερμοκρασιών από το 1901 (NOAA, 2016).

Έχει παρατηρηθεί ότι σε βόρεια μεγάλα γεωγραφικά πλάτη ότι οι υψηλότερες θερμοκρασίες προωθούν την αύξηση της παραγωγικότητας των φυτών κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού και την αναπνοή των φυτών κατά τη διάρκεια του χειμώνα. Από δορυφορικά στοιχεία διαφαίνεται ότι η φωτοσυνθετική δραστηριότητα της

χερσαίας βλάστησης αυξήθηκε από το 1981 έως το 1991 με τρόπο που υποδηλώνει αύξηση της παραγωγικότητας των φυτών που συνδέεται με την επιμήκυνση της ενεργού καλλιεργητικής περιόδου (εικόνα 5.3). Οι περιοχές που παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη αύξηση βρίσκονται μεταξύ 45 °N και 70 °N, όπου σημειώθηκε έντονη αύξηση της θερμοκρασίας κατά την άνοιξη λόγω της πρώιμης εξαφάνισης του χιονιού (Myneni, et al., 1997).



**Εικόνα 5.3.** Περιοχές που της Βόρειας Αμερικής, Ευρώπης και Ασίας που απελευθερώνονται νωρίτερα από το ψύχος την άνοιξη. Με ανοικτό πράσινο είναι ο μέσος των 1950 – 1952 και με σκούρο ο μέσος των 2009 – 2011 (Shirah, 2014).

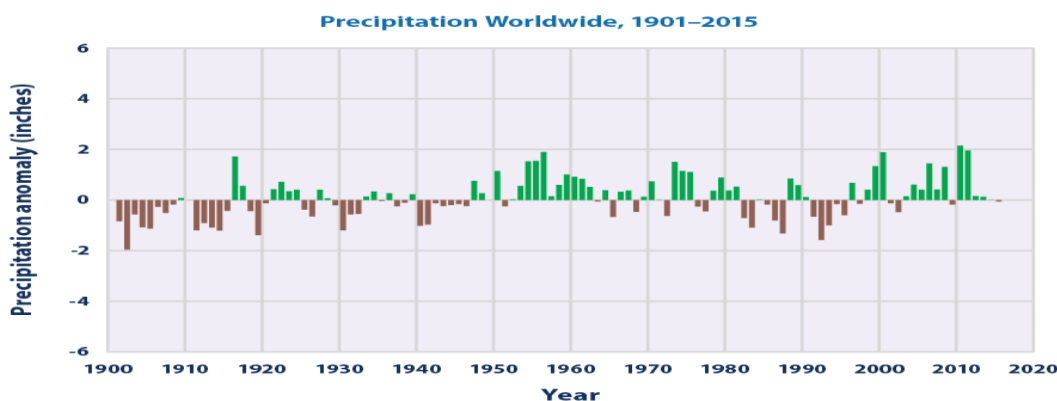
Η κλιματική αλλαγή έχει προκαλέσει αύξηση της παραγωγικότητας των φυτών και στα βόρεια μεσαία γεωγραφικά πλάτη πέραν από τα μεγάλα γεωγραφικά πλάτη. Οι παγκόσμιες μεταβολές του κλίματος διευκόλυναν αρκετούς κρίσιμους κλιματολογικούς περιορισμούς στην αύξηση των φυτών, έτσι ώστε η καθαρή πρωτογενής παραγωγή να αυξηθεί παγκοσμίως κατά 6%. Η μεγαλύτερη αύξηση παρατηρείται στα τροπικά δάση, ιδιαίτερη στα δάση του Αμαζονίου εξαιτίας της μείωσης της νεφοκάλυψης και της αντίστοιχης αύξησης της ηλιοφάνειας (Nemani, et al., 2003).

Στην εργασία τους οι Reich και Oleksyn (2004), υποστηρίζουν ότι ο λόγος N/P αυξάνεται προς τον ισημερινό ως συνέπεια της αύξησης της θερμοκρασίας και της διάρκειας της καλλιεργητικής περιόδου. Αυτό το πρότυπο είναι παρόμοιο για πέντε κυρίαρχες φυτικές ομάδες, κωνοφόρα δέντρα και τέσσερις ομάδες αγγειόσπερμων (χορτάρια, βότανα, θάμνοι και δέντρα). Το διαφυλλικό N και P αυξάνονται από τους

τροπικούς σε ψυχρότερα και ξηρότερα γεωγραφικά πλάτη λόγω της θερμοκρασιακής φυτικής φυσιολογικής στοιχειομετρίας και των βιογεωγραφικών κλίσεων στην ηλικία του υποστρώματος του εδάφους.

Διαφαίνεται λοιπόν ότι παρόλο που η άνοδος της θερμοκρασίας παγκοσμίως φαίνεται να είναι χαμηλή εντούτοις διαδραματίζει πολύ σημαντικό ρόλο σε τοπική κλίμακα και σε βαθμό μικροκλίματος. Είναι ένας παράγοντας που οπωσδήποτε ο εκάστοτε μελετητής απαιτείται να λάβει υπόψη του όταν το αντικείμενο της εργασίας του είναι η διερεύνηση του επηρεασμού της παραγωγικότητας της βλάστησης και ο εντοπισμός των περιοριστικών παραγόντων που επιδρούν σ' αυτήν.

Επιπλέον ένας άλλος κλιματικός παράγοντας που παρουσιάζονται ανωμαλίες στις μετρήσεις του είναι οι κατακρημνίσεις ως συνέπεια της κλιματικής αλλαγής (εικόνα 5.4.). Οι τάσεις δείχνουν αυξημένη διακύμανση των κατακρημνίσεων. Αναμένεται οι υγρές περιοχές να γίνουν πιο υγρές και οι ξηρές και άνυδρες περιοχές θα παραμείνουν ωστόσο με αυξημένη ξηρότητα και ανυδρία. Επιπρόσθετα αναμένεται το ακόλουθο γενικό μεταβαλλόμενο πρότυπο: α) αυξημένη κατακρήμνιση σε μεγάλα γεωγραφικά πλάτη (βόρειο ημισφαίριο), β) μείωση των κατακρημνίσεων στην Κίνα, την Αυστραλία και τα μικρά νησιωτικά κράτη του Ειρηνικού και (γ) αυξημένη διακύμανση στις ισημερινές περιοχές (Dore, 2005).



Data source: Blunden, J., and D.S. Arndt (eds.). 2016. State of the climate in 2015. B. Am. Meteorol. Soc. 97(8):S1-S275.  
For more information, visit U.S. EPA's "Climate Change Indicators in the United States" at [www.epa.gov/climate-indicators](http://www.epa.gov/climate-indicators).

**Εικόνα 5.4.:** Παγκόσμια καταγραφή βροχοπτώσεων 1901-2015 (Blunden and Arndt, 2016).

Τα μεταβαλλόμενα δεδομένα των κατακρημνίσεων είναι πιθανόν να μεταβάλλουν τη δομή και τη σύνθεση της φυτικής κοινότητας, με επακόλουθες επιδράσεις στη βιοποικιλότητα και τη λειτουργία των οικοσυστημάτων (Yank, et al., 2011). Οι αλλαγές στην ένταση των κατακρημνίσεων αναμένεται να προκαλέσουν μεγάλες μεταβολές

στην αύξηση των φυτών, ωστόσο δεν υπάρχουν αρκετές πειραματικές δοκιμές των επιπτώσεων της έντασης αυτής. Οι μικρές πειραματικές αυξήσεις στην ένταση των κατακρημνίσεων μπορούν να ωθήσουν το νερό του εδάφους βαθύτερα, αυξάνοντας την παραγωγικότητα των ξυλωδών φυτών πάνω από το έδαφος. Αυτή η αντίδραση φαίνεται να αντικατοπτρίζει την ικανότητα των ξυλωδών φυτών να αυξάνουν σε βάθος το ριζικό τους σύστημα (Kulmatiski and Beard, 2013).

Η πειραματική αύξηση της θερμοκρασίας και η αύξηση των κατακρημνίσεων γενικά προκάλεσαν την άνοδο της παραγωγικότητας των φυτών, ενώ η μειωμένη κατακρήμνιση είχε τα αντίθετα αποτελέσματα. Η αύξηση της θερμοκρασίας προκάλεσε σημαντικά την αύξηση της φωτοσύνθεσης και της αναπνοής του οικοσυστήματος. Η παραγωγικότητα των φυτών έδειξε γενικά υψηλότερες ευαισθησίες στις αυξημένες κατακρημνίσεις απ' ό,τι στις μειωμένες. Απαιτείται να γίνουν επιπλέον πειράματα με συνδυασμένους χειρισμούς θερμοκρασίας και κατακρημνίσεων για να καθοριστεί οριστικά η σημασία των αλληλεπιδράσεων τους στην ισορροπία των χερσαίων οικοσυστημάτων υπό τις μελλοντικές κλιματικές συνθήκες (Wu, 2011).

Ως εκ των άνωθεν δύναται να ειπωθεί ότι οι παράγοντες της θερμοκρασίας και των κατακρημνίσεων πρέπει να λαμβάνονται υπόψη όταν μελετάται η πιθανή αύξηση της παραγωγικότητας των δασών από την κλιματική αλλαγή. Σίγουρα είναι παράγοντες που δεν πρέπει να αποκλείεται η διερεύνηση της επίδραση τους, όταν μελετάται η παραγωγικότητα των δασών σε σχέση με την αλλαγή του κλίματος. Διαφορετικά θα υπάρχει η αδυναμία σε έρευνες που μελετούν την παραγωγικότητα των δασών και δεν έχουν ληφθεί υπόψη οι παράγοντες της ανόδου της θερμοκρασίας, των διακυμάνσεων των κατακρημνίσεων και ειδικά όπου το αντικείμενο μελέτης είναι είδη που δεν βρίσκονται στα θερμικά όρια της βλάστησης τους. Έτσι το οποιοδήποτε θετικό αποτέλεσμα θα παρερμηνευθεί ως θετική επίδραση της αύξησης του ατμοσφαιρικού CO<sub>2</sub> στην παραγωγικότητα των δασών.

Σε άλλη περίπτωση θα πρέπει τουλάχιστον οι εργασίες που στοχεύουν στη μελέτη της επίδρασης του ατμοσφαιρικού CO<sub>2</sub> στην παραγωγικότητα των δασών, να γίνονται σε είδη που βρίσκονται στα θερμικά όρια τους, σε τοποθεσίες που η άνοδος της θερμοκρασίας και οι κατακρημνίσεις αναμένεται να έχουν περιοριστικό ρόλο και αυτός να ληφθεί υπόψη. Για παράδειγμα εργασία που μελέτησε δακτυλίους των δέντρων από διάφορες θέσεις με υψόμετρο πάνω από 3000μ. στο βόρειο ημισφαίριο έδειξε αύξηση της παραγωγικότητας τους μεταξύ των ετών 1850 και 1980 (McKenzie, Hessl and

Peterson, 2001). Στο υψηλό αυτό υψόμετρο περιοριστικός παράγοντας είναι η θερμοκρασία όπου ενδεχομένως η άνοδος της να επεξηγεί την ευρεθείσα αύξηση της παραγωγικότητα των δασών.

Σε μελέτη που έγινε στους δακτυλίους των δέντρων στα είδη *Quercus petraea* και *Quercus robur* στις περιοχές Αυστρία, Ουγγαρία, Σλοβενία, Κροατία και Σερβία έδειξαν κοινή θετική απόκριση στις κατακρημνίσεις την άνοιξη και το καλοκαίρι (Μάρτιο και Ιούνιο) και μια αρνητική αντίδραση στην θερμοκρασία την άνοιξη και το καλοκαίρι (Απρίλιος και Ιούνιος) ως προς την αύξηση τους. Άλλες έδειξαν κοινή θετική απόκριση στις κατακρημνίσεις ιδιαίτερα την άνοιξη (Μάιος) και αρνητική σε υψηλές θερινές θερμοκρασίες (ειδικά τον Αύγουστο) με έντονη τάση από βορρά προς νότο. Επίσης έδειξε ότι ένας ζεστός προηγούμενος Δεκέμβριος και ένα ζεστό ρεύμα του Σεπτεμβρίου έχουν θετική επίδραση στην αύξηση των δένδρων, ειδικά στο νοτιοδυτικό τμήμα της περιοχής μελέτης (Cufar, et al., 2014)

Η θερμοκρασία είναι ο σημαντικότερος περιοριστικός παράγοντας για όλες τις αυξητικές διαδικασίες των δέντρων σε μεγάλα γεωγραφικά πλάτη. Σε μελέτη που έγινε σε δέντρα στα βόρεια όρια δασικής βλάστησης στη Σιβηρία διαφάνηκε ότι η αύξηση της θερμοκρασίας το καλοκαίρι και η αύξηση των κατακρημνίσεων από τους μήνες Οκτώβριο μέχρι Απρίλιο οδήγησε σε αύξηση της παραγωγικότητα των δασών. Σημαντικός επίσης παράγοντας για τα πιο πάνω είναι η τήξη του χιονιού αργότερα την Άνοιξη λόγω των αυξημένων χειμερινών κατακρημνίσεων (Kiralyanov, et al., 2003).

Το γεγονός αυτό επεξηγεί και τις αλλαγές στη συσχέτιση μεταξύ των τάσεων των δακτυλίων των δέντρων, δηλαδή της παραγωγής των δασών και της δυναμικής της θερμοκρασίας του καλοκαιριού που έχει εντοπιστεί σε κάποιες εργασίες (Briffa, Schweingruber, Jones and Osborn, 1998; Jacoby, et al., 2000), δηλαδή ότι δεν παρουσιάζεται πλέον συνάφεια μεταξύ τους. Αυτό εξηγείται από τη σημαντική επίδραση του χρόνου τήξης του χιονιού στο χρόνο της ενεργοποίησης του κάμβιου και κατά συνέπεια στην παραγωγικότητα των δασών (Kiralyanov, et al., 2003; Vaganov, et al., 1999).

Όσον αφορά τα τροπικά δάση σε σχετική μελέτη που έγινε προέκυψε ότι η αύξηση της θερμοκρασίας τις δεκαετίες 1980 και 1990 είχε ως συνέπεια τη μείωση της παραγωγικότητας των δασών και την αύξηση του ατμοσφαιρικού CO<sub>2</sub> στην περιοχή των τροπικών. Μια τέτοια ευαισθησία της παραγωγικότητας των τροπικών δασών στις

συνεχείς κλιματικές αλλαγές θα επιταχύνει το ρυθμό της συσσώρευσης ατμοσφαιρικού CO<sub>2</sub> (Clark, Piper, Keeling and Clark, 2003).

Το είδος *Picea glauca* σε μελέτη που έγινε χρησιμοποιώντας μετρήσεις από δακτυλίους των δέντρων στην περιοχή της Αλάσκας που ερευνούσε τη σχέση της αύξησης των δέντρων και της θερμοκρασίας βρέθηκε να παρουσιάζει μείωση της παραγωγικότητας η οποία αποδόθηκε σε υδατική καταπόνηση εξαιτίας της αύξησης της θερμοκρασίας (Barber, Juday and Finney, 2000). Όταν μελετήθηκε η παραγωγικότητα του είδους αυτού στην περιοχή Manitoba του Καναδά ως προς το ατμοσφαιρικό CO<sub>2</sub>, βρέθηκε να παρουσιάζει αύξηση (Wang, et al., 2006).

Επομένως στη μία εργασία το είδος *Picea glauca* στο βόρειο όριο της γεωγραφικής κατανομής του παρουσιάζει μείωση της παραγωγικότητας του που αποδίδεται στην αύξηση της θερμοκρασίας και στο μέσο της γεωγραφικής κατανομής του παρουσιάζει αύξηση που αποδίδεται στην αύξηση του ατμοσφαιρικού CO<sub>2</sub>. Από το γεγονός αυτό προκύπτει η ανάγκη να γίνουν περαιτέρω εξειδικευμένες μελέτες για κάθε δασικό είδος όσον αφορά την παραγωγικότητα του, που να μελετούν την επίδραση όλων των παραγόντων που επιδρούν σ' αυτή και έχουν διαφοροποιηθεί από την κλιματική αλλαγή.

Επιπλέον χρειάζεται να γίνεται χρήση της ίδιας μεθοδολογίας, να εντοπίζεται ο περιοριστικός παράγοντας της αύξησης για κάθε θέση μελέτης και να λαμβάνεται υπόψη η φυσιολογία του είδους και ο μηχανισμός αύξησης του. Ιδιαίτερα εάν αυτές οι μελέτες χρησιμοποιήσουν ως θέσεις μελέτης τα άκρα, τόσο της γεωγραφικής κατανομής αλλά και υψομέτρου βλάστησης, ενδέχεται να δώσουν πιο αντιπροσωπευτικά αποτελέσματα ως προς τη τάση της παραγωγικότητας των δασών σε σχέση με τους διαφοροποιημένους βιοκλιματικούς παράγοντες.

Οι επιπτώσεις της θερμοκρασίας στην αύξηση επηρεάζονται έντονα και από τη διαθεσιμότητα θρεπτικών συστατικών και την απορρόφηση τους. Αν και η διαφοροποίηση της δασικής παραγωγικότητας με αυξανόμενο το γεωγραφικό πλάτος υπογραμμίζει τον πρωταρχικό ρόλο ελέγχου του κλίματος στην αύξηση των δέντρων, ειδικά στα δάση των κωνοφόρων (Girardin et al., 2011), δευτερογενείς παράγοντες όπως η γονιμότητα του εδάφους και η ηλικία, παράγοντες που λειτουργούν με μεγαλύτερη χρονική υστέρηση, μπορεί να μετριάσουν τις άμεσες επιπτώσεις της θέρμανσης του κλίματος και της επίδρασης του CO<sub>2</sub> (Körner et al. 2005).

Πέραν από την άμεση επίδραση της θερμοκρασίας και των κατακρημνίσεων, έμμεσα σε συνέργεια με παραμέτρους όπως το υψόμετρο, η θέση βλάστησης, δηλαδή τις συντεταγμένες ως προς τη γεωγραφική εξάπλωση και ο προσανατολισμός έχουν καθοριστικό ρόλο στην ανταπόκριση των ειδών στις κλιματικές συνθήκες όπου κατά συνέπεια ο περιοριστικός παράγοντας στην αύξηση των δέντρων διαφοροποιείται. Το είδος *Pinus halepensis* στην περιοχή της ανατολικής Μεσογείου σε χαμηλά υψόμετρα παρουσιάζει σημαντική μείωση της παραγωγικότητας του ακόμη και θνησιμότητα μετά από συνεχή μείωση των κατακρημνίσεων (Sarris, Christodoulakis and Korner, 2010). Όμως στην περιοχή της Γαλλίας που το είδος βρίσκεται στο βόρειο τμήμα της γεωγραφικής κατανομής του σε ψυχρότερο και πιο υγρό κλίμα παρουσιάζει αντίθετα αποτελέσματα (Vila et al., 2008), ενώ δεν παρουσιάζει διαφοροποίηση στη νότια περιοχή της Ισπανίας (Camarero, Gazol, Tardif, et al., 2015). Το ίδιο συμβαίνει και στην Πελοπόννησο σε υψόμετρο 800μ. (Sarris, Christodoulakis and Korner, 2010).

Σε περιοχές με χαμηλό υψόμετρο και μείωση των κατακρημνίσεων όπου περιοριστικός παράγοντας είναι η υγρασία παρουσιάζεται μείωση της παραγωγικότητας των δασών. Το γεγονός αυτό έχει παρατηρηθεί στο είδος *Pinus halepensis* πέραν των αναφορών πιο πάνω και σε θέσεις στην Πελοπόννησο. Το ίδιο συμβαίνει και σε αρκετά είδη στην περιοχή της Κύπρου που βρίσκονται σε δασικές εκτάσεις σε χαμηλό υψόμετρο. Το είδος *Abies cephalonica* επίσης στην Πελοπόννησο στα χαμηλότερα υψομετρικά όρια του παρουσίασε θνησιμότητα εξαιτίας της έλλειψης υγρασίας 800 – 1000μ. σε αντίθεση με την ανταπόκριση του είδους επίσης στην Πελοπόννησο σε υψηλότερα υψόμετρα 2200μ. όπου υπάρχουν ενδείξεις για αύξηση της παραγωγικότητας (Sarris, Christodoulakis and Korner, 2010).

Διαφαίνεται ότι οι πρόσφατες τάσεις της αύξησης των δέντρων είναι αντίθετες στα κατώτερα και ανώτερα όρια των γεωγραφικών κατανομών των δασικών ειδών διότι στις περιοχές αυτές διαφοροποιείται ο περιοριστικός παράγοντας για κάθε θέση. Οι πιο πάνω αναφορές για το είδος *Abies cephalonica* σε υψηλά υψόμετρα στην Πελοπόννησο συνάδουν με τα ευρήματα άλλων εργασιών στο νησί της Κεφαλονιάς (Koutavas, 2008;2013) στο βουνό Αίνος σε υψόμετρο 1300 – 1500μ. που αποδίδονται αντίθετα στην αύξηση του ατμοσφαιρικού CO<sub>2</sub>. Όμως περιοριστικός παράγοντας σε μεγαλύτερα υψόμετρα είναι η θερμοκρασία εφόσον η υγρασία είναι επαρκής.

Σε έρευνα που έγινε στο είδος *Pinus Sylvestris* στην Ελβετία που βρίσκεται στο ενδιάμεσο προς νότιο τμήμα εξάπλωσης του σε υψόμετρο 800 – 1200μ. (Kienast and

Luxmoore, 1988) και στη νότια Γαλλία σε υψόμετρο 950μ. (Vila et al., 2008), δεν παρουσιάζει διαφοροποίηση, ενώ στην Ισπανία που βρίσκεται στο νότιο άκρο της κατανομής του σε υψόμετρο 1600μ. (Martínez-Vilalta et al., 2008), (Camarero, Gazol, Tardif, et al., 2015) και στο Ηνωμένο Βασίλειο σε χαμηλό υψόμετρο αλλά στο βόρειο τμήμα της κατανομής του, στα ψυχροόρια του (Waterhouse et al., 2004) παρουσιάζει αύξηση. Παρόλο που στις θέσεις όπου η θερμοκρασία είναι ο πιο περιοριστικός παράγοντας παρουσιάζεται αύξηση, δηλαδή σε μεγάλα υψόμετρα και μεγάλο γεωγραφικό πλάτος, εντούτοις σε δύο από τις τρεις εργασίες η αύξηση αποδίδεται στο ατμοσφαιρικό CO<sub>2</sub> (Martínez-Vilalta et al., 2008 και Waterhouse et al., 2004).

Σε εργασίες που ερεύνησαν είδη σε μεγάλα υψόμετρα (La Marche, et al. 1984 και Graybill, 1987) υπάρχει ο ισχυρισμός ότι τα δέντρα που βρίσκονται στις ανώτερες θέσεις βλάστησης σε μεγάλα υψόμετρα, με πολύ μεγάλη εξάρτηση από την θερμοκρασία την περίοδο της αύξησης θα ήταν τα πιο ευαίσθητα σε αυξημένα επίπεδα CO<sub>2</sub>. Όμως σε άλλες εργασίες στις θέσεις με τους πιο έντονους κλιματολογικούς περιορισμούς που δύναται να επικρατούν στο δάσος στα χαμηλότερα ή τα πάνω δασικά σύνορα καθώς και στις θέσεις με ευνοϊκές συνθήκες σε δασικές εκτάσεις δεν παρουσίασαν αύξηση στην παραγωγικότητα (Kienast and Luxmoore, 1988). Προκύπτει λοιπόν αρκετή αντίθεση των αποτελεσμάτων από έρευνες που φαίνεται να ερευνούν ίδιες θέσεις βλάστησης, γεγονός που προβληματίζει, τόσο για τη γενίκευση των αποτελεσμάτων όσο και η διαφοροποίηση των συνθηκών σε φαινομενικά ίδιες θέσεις μελέτης.

Έρευνες σε συστήματα με ποικιλία ειδών και με συσχέτιση χαμηλής γονιμότητας εδαφών καταλήγουν στο γεγονός ότι δεν υπάρχουν αποκρίσεις της παραγωγικότητας των δασών σε αυξημένο CO<sub>2</sub> (Hattenschwiler, Schweingruber and Korner, 1996; Williams, et al., 1986; Korner and Arnone, 1992; Norby, et al., 1995; Arnone and Korner, 1995). Το γεγονός αυτό δεικνύει ξανά ότι στην παραγωγικότητα των δασών επιδρούν και άλλοι παράγοντες πέραν των κλιματολογικών που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά τη μελέτη της επίδρασης του ατμοσφαιρικού CO<sub>2</sub>.

Τα περιβαλλοντικά χαρακτηριστικά καθώς και οι φυσιογραφικές και οικολογικές αλλαγές διαφέρουν σε κλίμακες εντός της γεωγραφικής κατανομής ενός είδους, δημιουργώντας τις συνθήκες για τη χωρική μεταβλητότητα στους περιοριστικούς παράγοντες και κατά συνέπεια την ευαισθησία των ειδών στην κλιματική μεταβλητότητα. Επομένως απαιτούνται λεπτομερέστερες μελέτες σε περιφερειακές και

μικρότερες κλίμακες για την ανίχνευση των τοπικών προτύπων των αποκρίσεων των μεμονωμένων ειδών και των κύριων περιορισμών τους (Carrer, et. al, 2007).

Τα δάση μεγάλου υψομέτρου και μεγάλου γεωγραφικού πλάτους είναι ευαίσθητα στη μεταβλητότητα του κλίματος λόγω της θέσης τους στα άκρα των περιοχών της γεωγραφικής κατανομής των δέντρων τους. Τα ανώτερα υψομετρικά όρια βλάστησης, στα ψυχροόρια των δασών, εμφανίζονται όταν οι σκληρές περιβαλλοντικές συνθήκες εμποδίζουν τη δημιουργία, την αύξηση και την επιβίωση των δέντρων. Η άμεση ή έμμεση αρνητική επίδραση της μείωσης της θερμοκρασίας του αέρα και του εδάφους με αυξανόμενο υψόμετρο θεωρείται ο κύριος περιορισμός στο ανώτερο υψόμετρο της εγκατάστασης των δέντρων στις περισσότερες ορεινές περιοχές. Συνεπώς η αύξηση της θερμοκρασίας ενδεχομένως να οδηγήσει σε αύξηση της παραγωγικότητας (Carrer, et. al, 2007).

Επιπρόσθετα και πιο εξειδικευμένα, σε μελέτες του είδους *Pinus cembra* στην οροσειρά των Άλπεων δεν εντοπίστηκαν χωρικά πρότυπα αύξησης στα χρονολογικά στατιστικά στοιχεία. Αυτό μπορεί να αποδοθεί στην (α) τοπική μεταβλητότητα του καιρού, (β) στις διαφορετικές βιοφυσικές συνθήκες που προκαλούνται από την υγρασία του εδάφους, την ηλιακή ακτινοβολία, τη δυναμική της τήξεως του χιονιού και το μήκος της αυξητικής περιόδου, και (γ) το ιστορικό και την ηλικιακή δομή των δασών, την έκφραση της μακροχρόνιας χρήσης της γης και των διαταραχών (Carrer, et. al, 2007).

Οι συνθήκες του χειμώνα και οι θερμοκρασίες της άνοιξης και του καλοκαιριού επηρέασαν κυρίως το μήκος της αυξητικής περιόδου, εκτός από την ισορροπία του άνθρακα και νερού. Οι περισσότεροι από αυτούς τους περιοριστικούς παράγοντες ποικίλουν χωρικά και χρονικά στις διαβαθμίσεις των γεωγραφικού μήκους και πλάτους σε ανταπόκριση στις αντίστοιχες αλλαγές στις τοπικές συνθήκες. Υπάρχουν αποτελέσματά ερευνών που δείχνουν μια σαφή μεταβλητότητα απόκρισης του *Pinus cembra* σε παράγοντες που περιορίζουν το κλίμα, τόσο σε χωρική όσο και σε χρονική κλίμακα. Αυτές οι γνώσεις που επεκτείνονται σε άλλα είδη και περιοχές θα παρέχουν καλύτερες εκτιμήσεις για την επίδραση της μεταβλητότητας του κλίματος στην κατανομή και τη δυναμική του είδους μέσα στα σενάρια της παγκόσμιας αλλαγής και στην ακριβέστερη ανακατασκευή του κλίματος από το παρελθόν και στη μοντελοποίηση των δασικών οικοσυστημάτων (Carrer, et. al, 2007).

Από την παράθεση δεδομένων που μελέτησαν την απόκριση αύξησης των ειδών στις μεταβαλλόμενες κλιματικές συνθήκες προκύπτει ότι αυτή επηρεάζεται έντονα από πολλούς εξειδικευμένους παράγοντες. Οι εξειδικεύσεις αυτές καταγράφονται ως αυτές της θερμοκρασίας και των κατακρημνίσεων σε συσχέτιση με τους επιμέρους παράγοντες όπως τη χωρική και χρονική μεταβλητότητα των συνθηκών, ως εκ τούτου τη θέση μελέτης, τη γεωγραφική κατανομή του είδους, το υψόμετρο, τον προσανατολισμό, την επιμήκυνση της αυξητικής περιόδου, τη τήξη του χιονιού, την ηλιακή ακτινοβολία, τις φυσικές και ανθρωπογενείς διαταραχές καθώς και την ηλικία των δέντρων, τη γονιμότητα του εδάφους, την πυκνότητα της βλάστησης τη φυσιολογία του φυτού και τον τρόπο φωτοσύνθεσης.

Ο αριθμός των πιο πάνω καταγεγραμμένων παραγόντων που προέκυψαν από τη βιβλιογραφική ανασκόπηση και που δύναται να επηρεάσουν την παραγωγικότητα των δασών είναι ενδεικτικός για την προσοχή που απαιτείται να τυγχάνει η διερεύνηση της απόκρισης της στην κλιματική αλλαγή. Δεικνύει περαιτέρω την ανάγκη ότι οι εργασίες που έχουν ως στόχο να αποδώσουν την οποιαδήποτε ευρεθείσα τάση στην παραγωγικότητα των δασών σε συγκεκριμένο παράγοντα όπως το ατμοσφαιρικό CO<sub>2</sub>, απαιτείται να διερευνηθούν και να λάβουν υπόψη αυτές τις εξειδικεύσεις. Σε άλλη περίπτωση υπάρχει ο κίνδυνος παρερμηνείας των ευρημάτων.

## 5.2 Περιορισμοί μελέτης

Ως αδυναμία της παρούσας διατριβής καταγράφεται ενδεχομένως ο περιορισμένος αριθμός εργασιών που εξετάστηκε. Επιπλέον αδυναμία είναι το γεγονός ότι δεν καταγράφονται και αναλύονται δεδομένα της τοπογραφίας και του προσανατολισμού όπως βόρεια ή νότια έκθεση και των εποχικών διακυμάνσεων της θερμοκρασίας και των κατακρημνίσεων. Παράμετροι οι οποίοι έχουν καθοριστικό ρόλο στην αύξηση των δέντρων και την απόκριση άλλων παραγόντων σ' αυτή. Η ύπαρξη των δεδομένων αυτών θα οδηγούσε στην πληρέστερη ανάλυση και αντιπαραβολή των αποτελεσμάτων των εργασιών με τα δεδομένα της γεωγραφικής κατανομής των ειδών, γεγονός που θα οδηγούσε σε ασφαλέστερα συμπεράσματα.

## 5.3 Συμπεράσματα

Ως εκ των άνωθεν δύναται να τεκμηριωθεί η αξίωση ότι όπου παρατηρείται αύξηση της παραγωγικότητας των δέντρων δεν πρέπει να συνδέεται αδιαμφισβήτητα και αποκλειστικά με την αύξηση του ατμοσφαιρικού CO<sub>2</sub>. Διαφαίνεται ότι οι μελέτες για την παραγωγικότητα των δασών πρέπει να εντοπίζουν όλους τους πιθανούς περιοριστικούς παράγοντες που δύναται να την επηρεάσουν στη συγκεκριμένη θέση μελέτης για να δύνανται να καταλήξουν σε ασφαλή συμπεράσματα.

Ο μηχανισμός της αύξησης των δέντρων και η επιμέρους διεργασία της δέσμευσης του ανόργανου άνθρακα μέσω της φωτοσύνθεσης είναι περίπλοκες διαδικασίες όπου επενεργούν μεταξύ άλλων και όλοι οι παράγοντες στους οποίους γίνεται αναφορά στη παρούσα διατριβή. Το γεγονός να μην λαμβάνονται υπόψη και να μην συσχετίζονται με τα συμπεράσματα των εργασιών που μελετούν την επίδραση της αύξησης του ατμοσφαιρικού CO<sub>2</sub> στην παραγωγικότητα των δασών, δύναται να οδηγήσει σε αδυναμίες των αποτελεσμάτων και παρερμηνεία των ευρημάτων τους ως προς τη σχέση των περιοριστικών παραγόντων στη συγκεκριμένη θέση μελέτης που εξετάζουν.

Από τη βιβλιογραφική ανασκόπηση των εργασιών επί του ζητήματος δύναται να διαπιστωθεί εκ πρώτης όψεως ότι, η αύξηση του CO<sub>2</sub> της ατμόσφαιρας επιδρά θετικά στην παραγωγικότητα των δασών ένεκα της πλειοψηφίας των εργασιών που καταλήγουν σε αυτό συμπέρασμα. Όμως πιο προσεκτική ανάγνωση και ανάλυση των εργασιών αυτών, όπως εν μέρη έγινε στη διατριβή αυτή, οδηγεί στο συμπέρασμα ότι ενδεχομένως η ευρεθείσα αύξηση της παραγωγικότητας στις εργασίες αυτές, να συνδέεται και με άλλους περιοριστικούς παράγοντες της αύξησης των δέντρων πέραν του CO<sub>2</sub> και να ανεγείρεται θέμα παρερμηνείας των αποτελεσμάτων από τους μελετητές.

Επιπλέον ένας άλλος σημαντικός δείκτης των τάσεων που παρουσιάζονται στη βιβλιογραφία επί του ζητήματος, είναι και ο αντίκτυπος των εργασιών αυτών στην επιστημονική κοινότητα. Η βαρύτητα των εργασιών αυτών, με βάση τον αριθμό αναφορών τους, φαίνεται να είναι περιορισμένη σε σχέση με αυτών που καταλήγουν σε μη επίδραση του ατμοσφαιρικού CO<sub>2</sub> στην παραγωγικότητα των δασών.

Συνεπώς τίθεται εύλογα ο προβληματισμός κατά πόσον, σημαντικό μέρος της επιστημονικής κοινότητας προσεγγίζει ορθά και ενδεδειγμένα το ζήτημα αυτό κατά την

εξέταση του. Όπως φάνηκε στη διατριβή αυτή, στη βιβλιογραφική ανασκόπηση και στη συζήτηση, είναι αρκετοί οι παράμετροι που επενεργούν στην παραγωγικότητα των δασών με πολύπλοκη δράση μεταξύ τους και όσοι περισσότεροι από αυτούς συνυπολογίζονται και εξετάζονται στην προσέγγιση του θέματος τόσο απομακρύνεται η περίπτωση να αποδοθεί αποκλειστικά ή έστω μερικώς, θετική επίδραση του ατμοσφαιρικού CO<sub>2</sub> στην παραγωγικότητα των δασών.

## 5.4 Εισηγήσεις

Οι εργασίες που μελετούν ή θα μελετήσουν την παραγωγικότητα των δασών χρειάζεται να αναφέρουν και να μελετούν στοιχεία όπως τις διακυμάνσεις της θερμοκρασίας και των κατακρημνίσεων, τη χωρική και χρονική μεταβλητότητα των συνθηκών, ως εκ τούτου τη θέση μελέτης, τη γεωγραφική κατανομή του είδους, το υψόμετρο, τον προσανατολισμό, την επιμήκυνση της αυξητικής περιόδου, τη τήξη του χιονιού, την ηλιακή ακτινοβολία, τις φυσικές και ανθρωπογενείς διαταραχές, την ηλικία των δέντρων, τη γονιμότητα του εδάφους και τη διαθεσιμότητα των θρεπτικών στοιχείων, την πυκνότητα της βλάστησης, τον εξειδικευμένο μηχανισμό αύξησης του είδους προς μελέτη καθώς και τον τρόπο που τον επηρεάζουν οι πιο πάνω παράγοντες. Έτσι θα δεικνύεται καλύτερα και ορθότερα σε πια θερμοκά όρια είναι η βλάστηση που μελετάται και ποιοι είναι οι παράμετροι που πιθανόν να επενεργούν στην παραγωγικότητα των δασών στη συγκεκριμένη θέση μελέτης.

Γενικότερα περισσότερες και πιο εκτεταμένες έρευνες όσον αφορά τις επιδράσεις του CO<sub>2</sub> και τα αποτελέσματα σε διάφορα οικοσυστήματα όπως ημι-άνυδρα και άγονα περιβάλλοντα σίγουρα θα συμβάλουν στην καλύτερη κατανόηση των παγκόσμιων αποθεμάτων άνθρακα, στις μεταβολές του υφιστάμενου μοντέλου κύκλου του άνθρακα καθώς και στην προσαρμογή των μακροπρόθεσμων πολιτικών αναδάσωσης οι οποίες θα μπορούσαν να μετριάσουν τη συνεχιζόμενη αύξηση του CO<sub>2</sub> στην ατμόσφαιρα.

Τελικώς χρειάζονται να γίνουν επιπλέον έρευνες προς εξέταση του ζητήματος, οι οποίες να συσχετίζουν όλες τις πιο πάνω παραμέτρους, που καταγράφηκαν ότι δύνανται να επηρεάσουν τα αποτελέσματα τους και να οδηγήσουν ενδεχομένως σε παρερμηνεία τους. Υπάρχει ανάγκη διερεύνησης της απόκρισης της παραγωγικότητας των δασών στην κλιματική αλλαγή, ούτως ώστε να καταστεί δυνατό να ληφθούν ορθά μέτρα

μετριάσμού των συνεπειών και προσαρμογής τους. Όμως οι έρευνες αυτές σύμφωνα με τα ευρήματα της παρούσας διατριβής, χρειάζεται να γίνουν με εξειδικεύσεις τόσο ως προς τα είδη βλάστησης όσο και ως προς τους παράγοντες που επηρεάζουν την αύξηση τους. Η συσχέτιση των αποτελεσμάτων αυτών ενδεχομένως να δώσει καλύτερη εικόνα στην απόκριση των ειδών στην κλιματική αλλαγή.

# 6 Βιβλιογραφία

Arnone, A. J. and Korner, C., 1995. Soil and biomass carbon pools in model communities of tropical plants under elevated CO<sub>2</sub>. *Oecologia* [e-journal] 104, pp. 61 – 71. Available through: SpringerLink database [Accessed 29 December 2018].

Australia Government, Bureau of Meteorology, 2019. *Australian climate variability & change - Trend maps*. [image online]. Available at: <  
<http://www.bom.gov.au/climate/change/index.shtml#tabs=Tracker&tracker=trend-maps&tQ=map%3Drain%26area%3Daus%26season%3D0112%26period%3D1970>

Badeau, V. et al. (1996) 'Long-Term Growth Trends of Trees: Ten Years of Dendrochronological Studies in France', in *Growth Trends in European Forests*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, pp. 167–181.

Bader, M. K. F. et al. (2013) 'Central European hardwood trees in a high-CO<sub>2</sub> future: synthesis of an 8-year forest canopy CO<sub>2</sub> enrichment project', *Journal of Ecology*, 101(6), pp. 1509–1519.

Battipaglia, G. et al. (2015) 'Long Tree-Ring Chronologies Provide Evidence of Recent Tree Growth Decrease in a Central African Tropical Forest', *PLoS ONE*. Edited by L. C. R. Silva, 10(3), pp. 1–21.

Becker, M. (1989a) 'The role of climate on present and past vitality of silver fir forests in the Vosges mountains of northeastern France', *Canadian Journal of Forest Research*, 19(9), pp. 1110–1117.

Becker, M. (1989b) 'The role of climate on present and past vitality of silver fir forests in the Vosges mountains of northeastern France', *Canadian Journal of Forest Research*. NRC Research Press Ottawa, Canada, 19(9), pp. 1110–1117.

Becker, M., Nieminen, T. M. and Geremia, F. (1994) 'Short-term variations and long-term changes in oak productivity in northeastern France. The role of climate and atmospheric CO<sub>2</sub>', *Annales des Sciences Forestières*, 51(5), pp. 477–492.

Berner, T.L. et al., 2011. High-latitude tree growth and satellite vegetation indices: Correlations and trends in Russia and Canada (1982–2008). *JGR Biogeosciences* [e-journal] 116(G1), Available through: Wiley Online Library database [Accessed 18 January 2019].

Bert, D. (1992) *Influence du climat des facteurs stationnels et de la pollution sur la croissance et l'état sanitaire du Sapin pectiné (Abies alba Mill) dans le Jura*. Etude phytoécologique et dendrochronologique, Sciences du Bois Biologie Végétale et Forestière. Nancy 1.

Blunden, J. and Arndt, D.S., 2016. *Precipitation Worldwide, 1901–2015*. [image online]. Available at: <https://www.epa.gov/climate-indicators/climate-change-indicators-us-and-global-precipitation> [Accessed 09 December 2018].

Bodin, P. and Wiman, B. L. B. (2007) 'The usefulness of stability concepts in forest management when coping with increasing climate uncertainties', *Forest Ecology and Management*. Elsevier, 242(2–3), pp. 541–552.

- Boisvenue, C. and Running, S. W. (2006) 'Impacts of climate change on natural forest productivity - evidence since the middle of the 20th century', *Global Change Biology*, 12(5), pp. 862–882.
- Bolte, A. et al. (2009) 'Adaptive forest management in central Europe: Climate change impacts, strategies and integrative concept', *Scandinavian Journal of Forest Research*. Taylor & Francis Group, 24(6), pp. 473–482.
- Bonan, G. B. (2008) 'Forests and climate change: Forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests', *Science*. American Association for the Advancement of Science, 320(5882), pp. 1444–1449.
- Boucher, E. et al. (2014) 'An inverse modeling approach for tree-ring-based climate reconstructions under changing atmospheric CO<sub>2</sub> concentrations', *Biogeosciences*, 11(12), pp. 3245–3258.
- Bowman, D. M. J. S. et al. (2013) 'Detecting trends in tree growth: Not so simple', *Trends in Plant Science*, 18(1), pp. 11–17.
- Brienen, R. J. W., Gloor, E. and Zuidema, P. A. (2012) 'Detecting evidence for CO<sub>2</sub> fertilization from tree ring studies: The potential role of sampling biases', *Global Biogeochemical Cycles*, 26(1), p. n/a.
- Briffa, K. R. et al. (1998) 'Trees tell of past climates: but are they speaking less clearly today?', *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*. The Royal Society, 353(1365), pp. 65–73.
- Briffa, K. R. et al. (2008) 'Trends in recent temperature and radial tree growth spanning 2000 years across northwest Eurasia', *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 363(1501), pp. 2269–2282.
- Briffa, K.R., Schweingruber, F.H., Jones, P.D. and Osborn T.J., 1998. Reduced sensitivity of recent tree-growth to temperature at high northern latitudes. *Nature* [e-journal], 391, pp. 678–682. Available through: Nature database [Accessed 18 January 2019].
- Bugmann, H. and Bigler, C. (2011) 'Will the CO<sub>2</sub> fertilization effect in forests be offset by reduced tree longevity?', *Oecologia*. Springer-Verlag, 165(2), pp. 533–544.
- Camarero, J. J., Gazol, A., Galván, J. D., et al. (2015) 'Disparate effects of global-change drivers on mountain conifer forests: Warming-induced growth enhancement in young trees vs. CO<sub>2</sub> fertilization in old trees from wet sites', *Global Change Biology*, 21(2), pp. 738–749.
- Camarero, J. J., Gazol, A., Tardif, J. C., et al. (2015) 'Attributing forest responses to global-change drivers: Limited evidence of a CO<sub>2</sub>-fertilization effect in Iberian pine growth', *Journal of Biogeography*, 42(11), pp. 2220–2233.
- Canadell, J. G. and Pataki, D. (2002) 'New advances in carbon cycle research', *Trends in Ecology and Evolution*. Elsevier Current Trends, 17(4), pp. 156–158.
- Carrer, M., et al., 2007. Regional variability of climate–growth relationships in *Pinus cembra* high elevation forests in the Alps. *Journal of Ecology*, [e-journal], 95(5), pp. 1072–1083. Available through: British Ecological Society database [Accessed 18 January 2019].
- Carrer, M., Nola, P., Motta, R. and Urbinati, C., 2010. Contrasting tree-ring growth to climate responses of *Abies alba* toward the southern limit of its distribution area. *Oikos*, [e-journal], 119(9), pp. 1515–1525. Available through: Wiley Online Library database [Accessed 18 January 2019].

- Carrión, J. S. (2003) 'Sobresaltos en el bosque mediterráneo: incidencia de las perturbaciones observables en una escala paleoecológica', *Ecosistemas*, 12(3).
- Castells, E. et al. (2002) 'Intraspecific variability of phenolic concentrations and their responses to elevated CO<sub>2</sub> in two mediterranean perennial grasses', *Environmental and Experimental Botany*. Elsevier, 47(3), pp. 205–216.
- Catovsky, S., Holbrook, N. M. and Bazzaz, F. A. (2002) 'Coupling whole-tree transpiration and canopy photosynthesis in coniferous and broad-leaved tree species', *Canadian Journal of Forest Research*. NRC Research Press Ottawa, Canada, 32(2), pp. 295–309.
- Clark, D. A., Piper, S.C., Keeling, C. D. and Clark, D. B., 2003. Tropical rain forest tree growth and atmospheric carbon dynamics linked to interannual temperature variation during 1984–2000. *PNAS* [e-journal], 100(10), pp. 5852-5857. Available through: PNAS database [Accessed 18 January 2019].
- Climate Change Connection, 2016. Is the climate changing? [online] (2016). Available at: <[https://climatechangeconnection.org/science/climate\\_changing/global-climate/](https://climatechangeconnection.org/science/climate_changing/global-climate/)> [Accessed 18 January 2019].
- Cole, C. T. et al. (2010) 'Rising concentrations of atmospheric CO<sub>2</sub> have increased growth in natural stands of quaking aspen (*Populus tremuloides*)', *Global Change Biology*, 16(8), pp. 2186–2197.
- Constantinidou, A.I.H, 2002. *Plant Physiology*. 1st ed. Thessaloniki: Aristotle University of Thessaloniki, part of publications.
- Cook, E. R. (1987) *The Decomposition of Tree-Ring Series for Environmental Studies*, *Tree-Ring Bulletin*.
- Crane, A. J. (1983) 'Carbon dioxide review: 1982, W. C. Clarke (ed.), Oxford University Press, 1982.', *Journal of Climatology*, 3(2), pp. 212–213.
- Cufar, K., et al., 2014. Common climatic signals affecting oak tree-ring growth in SE Central Europe. *Trees*, [e-journal], 28(5), pp. 1267-1277. Available through: SpringerLink database [Accessed 18 January 2019].
- DALE, V. H. et al. (2001) 'Climate Change and Forest Disturbances', *BioScience*, 51(9), p. 723.
- De Luís, M. et al. (2001) 'Climatic trends, disturbances and short-term vegetation dynamics in a Mediterranean shrubland', *Forest Ecology and Management*. Elsevier, 147(1), pp. 25–37.
- Delzon, S. et al., 2013. Field Evidence of Colonisation by Holm Oak, at the Northern Margin of Its Distribution Range, during the Anthropocene Period. *PLOS ONE* [e-journal] 8(11). Available through: ResearchGate database [Accessed 12 December 2018].
- Déqué, M., Marquet, P. and Jones, R. G. (1998) 'Simulation of climate change over Europe using a global variable resolution general circulation model', *Climate Dynamics*. Springer-Verlag, 14(3), pp. 173–189.
- Diamantidis, G., 2002. *Introduction to biochemistry*. 2nd ed. Thessaloniki: University Studio Press.
- Dios, R. D. V., Fischer, C. and Colinas, C. (2007) 'Climate change effects on mediterranean forests and preventive measures', *New Forests*. Kluwer Academic Publishers, 33(1), pp. 29–40.

- Dore, H.I.M., 2005. Climate change and changes in global precipitation patterns: What do we know? *Environment International*, [e-journal] 31(8), pp. 1167-1181. Available through: ScienceDirect database [Accessed 09 December 2018].
- Duinker, P. N. (1990) 'Climate change and forest management, policy and land use', *Land Use Policy*. Pergamon, 7(2), pp. 124–137.
- Easterling, D.R., et al., 2017. Precipitation changes in the United States. *Climate Science Special Report: Fourth National Climate Assessment*. [e-journal] 1, pp. 207 – 230. Available at: <<https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20180001312.pdf>> [Accessed 12 December 2018].
- Easterling, W. E., Hurd, B. H. and Smith, J. B. (2004) 'Coping with global climate change: The role of adaptation in the United States', *Occupational medicine (Oxford, England)*, 61, pp. 1–40.
- EEA, 2018c. *Observed trends in maximum annual five-day consecutive precipitation in winter and summer*. [image online]. Available at: <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/figures/trends-in-consecutive-days-dry-2> [Accessed 12 December 2018].
- EEA. 2018b. *Trends in annual and summer precipitation across Europe between 1960 and 2015*. [image online]. Available at: <<https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/figures/trends-in-annual-left-and>> [Accessed 12 December 2018].
- EUFORGEN, 2019. *Distribution map*. [image online]. Available at: <<http://www.euforgen.org/>> [Accessed 12 December 2018].
- EEA, 2018a. *Trends in annual temperature across Europe between 1960 and 2017*. [image online]. Available at: <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/figures/decadal-average-trends-in-mean-8> [Accessed 12 December 2018].
- Feng, D., Huang, X., Liu, Y. and Willison, J.H.M., 2016. Growth and changes of endogenous hormones of mulberry roots in a simulated rocky desertification area. *Environmental Science and Pollution Research*, [e-journal], 23(11) pp. 11171–11180. Available through: SpringerLink database [Accessed 18 January 2019].
- Ford, J. D. et al. (2007) 'Reducing vulnerability to climate change in the Arctic: The case of Nunavut, Canada', *Arctic*, 60(2), pp. 150–166.
- Fritts, H., Bradley and Raymond, S. (1978) *Tree Rings and Climate, Arctic and Alpine Research*.
- Füssel, H.-M. (2007) 'Adaptation planning for climate change: concepts, assessment approaches, and key lessons', *Sustainability Science*. Springer-Verlag, 2(2), pp. 265–275.
- Gaucherel, C., Guiot, J. and Misson, L. (2008) 'Evolution of the potential distribution area of french mediterranean forests under global warming', *Biogeosciences Discussions*, 5(1), pp. 573–603.
- Gedalof, Z. and Berg, A. A. (2010) 'Tree ring evidence for limited direct CO<sub>2</sub> fertilization of forests over the 20th century', *Global Biogeochemical Cycles*, 24(3), pp. 2–7.
- Giovannini, G. et al. (2001) 'Effects of land use and eventual fire on soil erodibility in dry Mediterranean conditions', *Forest Ecology and Management*. Elsevier, 147(1), pp. 15–23.
- Girardin, M. P. et al. (2011) 'Testing for a CO<sub>2</sub> fertilization effect on growth of Canadian boreal forests', *Journal of Geophysical Research*. Wiley-Blackwell, 116(G1), p. G01012.
- Global Biodiversity Information Facility, 2019. *Distribution map*. [image online]. Available at: <<https://www.gbif.org/>> [Accessed 2 January 2019].

GLOBAL FOREST WATCH, 2018. *Global tree cover gain and loss*. [image online]. Available at: <<https://www.globalforestwatch.org/map?analysis=eyJzaG93QW5hbHlzaXMiOmZhbHNILCJoaWRkZW4iOmZhbHNlfQ%3D%3D&map=eyJ6b29tIjozLCJjZW50ZXIiOmsibGF0IjoyNy4yMTU1NTYyMDkwMjk2OSwibG5nljotNy4zODI4MTI1MDAwMDAwMDF9LCJjYW5Cb3VuZCI6ZmFsc2UsImJib3giOm51bGwsInNob3dCYXNlbWFWcy16ZmFsc2V9&menu=eyJtZW51U2VjdGlvbil6liIsImRhdGFzZXRDYXRlZ29yeSI6Ij9&recentImagery=eyJ2aXNpYmxlIjpmYWxzZX0%3D>> [Accessed 09 December 2018].

Grainger, A., et al., 2000. Desertification, and climate change: the case for greater convergence. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, [e-journal], 5(4), pp. 361-377. Available through: SpringerLink database [Accessed 18 January 2019].

Graumlich, L. J. (1991) 'Subalpine tree growth, climate, and increasing CO<sub>2</sub>: an assessment of recent growth trends', *Ecology*, 72(1), pp. 1-11.

Graybill, D. A. (1986) *A network of high elevation conifers in the western U.S. for detection of tree-ring growth responses to increasing atmospheric carbon dioxide*, *Symposium on Ecological Aspects of Tree-Ring Analysis*. U.S. Department of Energy. Office of Energy Research.

Graybill, D. A. and Idso, S. B. (1993) 'Detecting the aerial fertilization effect of atmospheric CO<sub>2</sub> enrichment in tree-ring chronologies', *Global Biogeochemical Cycles*. Wiley-Blackwell, 7(1), pp. 81-95.

Guo, L. B. and Gifford, R. M. (2002) 'Soil carbon stocks and land use change: A meta analysis', *Global Change Biology*. Wiley/Blackwell, 8(4), pp. 345-360.

Hare, B. and Meinshausen, M. (2006) 'How much warming are we committed to and how much can be avoided?', *Climatic Change*. Springer Netherlands, 75(1-2), pp. 111-149.

Hättenschwiler, S. *et al.* (1997) 'Thirty years of in situ tree growth under elevated CO<sub>2</sub>: a model for future forest responses?', *Global Change Biology*, 3(5), pp. 463-471.

Hättenschwiler, S., Schweingruber, F. H. and Körner, C. (1996) 'Tree ring responses to elevated CO<sub>2</sub> and increased N deposition in *Picea abies*', *Plant, Cell and Environment*. Wiley/Blackwell, 19(12), pp. 1369-1378.

Helldén, U., 1991. Desertification: Time for an Assessment. *Ambio*, [e-journal], 20(8), pp. 372-383. Available through: JSTOR database [Accessed 18 January 2019].

Heller, N. E. and Zavaleta, E. S. (2009) 'Biodiversity management in the face of climate change: A review of 22 years of recommendations', *Biological Conservation*. Elsevier, 142(1), pp. 14-32.

Holling, C. S. (2001) 'Understanding the Complexity of Economic, Ecological, and Social Systems', *Ecosystems*, 4(5), pp. 390-405.

Hook, J. and Sandercock, P., 2012. Use of vegetation to combat desertification and land degradation: Recommendations and guidelines for spatial strategies in Mediterranean lands. *Landscape and Urban Planning*, [e-journal], 107(4) pp. 389-400. Available through: ScienceDirect database [Accessed 18 January 2019].

Hornbeck, J. W., Smith, R. B. and Federer, C. A. (1988) 'Growth trends in 10 species of trees in New England, 1950-1980', *Canadian Journal of Forest Research*, 18(10), pp. 1337-1340.

Huang, J.-G. *et al.* (2007) 'Response of Forest Trees to Increased Atmospheric CO<sub>2</sub>', *Critical Reviews in Plant Sciences*, 26(5-6), pp. 265-283.

Ibanez, C., et al., 2018. Brassinosteroids Dominate Hormonal Regulation of Plant Thermomorphogenesis via BZR1. *Current Biology*, [e-journal] 28(2), pp.303-310. Available through: Current Biology database [Accessed 09 December 2018].

- IPCC, 2001. *Annual precipitation trends: 1900 to 2000*. [image online]. Available at:< <https://www.hvfarmscape.org/signs-change-reflections-winter-landscape>> [Accessed 2 January 2019].
- IPCC, 2013. Summary for Policymakers. [online] IPCC. Available at:< [https://ar5-syr.ipcc.ch/topic\\_observedchanges.php](https://ar5-syr.ipcc.ch/topic_observedchanges.php)> [Accessed 18 January 2019].
- Jacoby, C.G., et al., 2000. Long-Term Temperature Trends and Tree Growth in the Taymir Region of Northern Siberia. *Quaternary Research* [e-journal], 53(3), pp. 312-318. Available through: Cambridge University Press database [Accessed 18 January 2019].
- Jacoby, G. C. and D'Arrigo, R. D. (1997) 'Tree rings, carbon dioxide, and climatic change.', *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. National Academy of Sciences, 94(16), pp. 8350-3.
- Jiang, Z., Lian, Y. and Qin, X., 2014. Rocky desertification in Southwest China: Impacts, causes, and restoration. *Earth-Science Reviews*, [e-journal], 132, pp. 1-12. Available through: SpringerLink database [Accessed 18 January 2019].
- Kergoat, L. et al. (2002) 'Impact of doubled CO<sub>2</sub> on global-scale leaf area index and evapotranspiration: Conflicting stomatal conductance and LAI responses', *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 107(24), p. 4808.
- Kienast, F. and Luxmoore, R. J. (1988) 'Tree-ring analysis and conifer growth responses to increased atmospheric CO<sub>2</sub> levels', *Oecologia*, 76(4), pp. 487-495.
- Kirdyanov, A., et al., 2003. The importance of early summer temperature and date of snow melt for tree growth in the Siberian Subarctic. *Trees* [e-journal], 17(1), pp. 61-69. Available through: SpringerLink database [Accessed 18 January 2019].
- Knapp, P. A. and Soulé, P. T. (1996) 'Vegetation Change and the Role of Atmospheric CO<sub>2</sub> Enrichment on a Relict Site in Central Oregon: 1960-1994', *Annals of the Association of American Geographers*, 86(3), pp. 387-411.
- Knapp, P. A. et al. (2001) 'Detecting potential regional effects of increased atmospheric CO<sub>2</sub> on growth rates of western juniper', *Global Change Biology*. Wiley/Blackwell, 7(8), pp. 903-917.
- Korner, C. (2005) 'Carbon Flux and Growth in Mature Deciduous Forest Trees Exposed to Elevated CO<sub>2</sub>', *Science*, 309(5739), pp. 1360-1362.
- Korner, C. and Arnone, A.J., 1992. Responses to Elevated Carbon Dioxide in Artificial Tropical Ecosystems. *Science* [e-journal] 257(5077), pp. 1672-1675. Available through: Science database [Accessed 29 December 2018].
- Koutavas, A. (2008) 'Late 20th century growth acceleration in greek firs (*Abies cephalonica*) from Cephalonia Island, Greece: A CO<sub>2</sub> fertilization effect?', *Dendrochronologia*. Urban & Fischer, 26(1), pp. 13-19.
- Koutavas, A. (2013) 'CO<sub>2</sub> fertilization and enhanced drought resistance in Greek firs from Cephalonia Island, Greece', *Global Change Biology*, 19(2), pp. 529-539.
- Kulmatiski, A., and Beard, H. K., 2013. Woody plant encroachment facilitated by increased precipitation intensity. *Nature Climate Change*, [e-journal] 3, pp. 833-837. Available through: Nature database [Accessed 09 December 2018].
- Kurz, W. A. et al. (2002) 'Forest carbon accounting at the operational scale', *Forestry Chronicle*, 78(5), pp. 672-679.
- Lamarche, V. C. et al. (1984) 'Increasing Atmospheric Carbon Dioxide: Tree Ring Evidence for

- Growth Enhancement in Natural Vegetation', *Science*, 225(4666), pp. 1019–1021.
- Lambers, H., Chapin, S. F. and Pons, L. T., 2008. Photosynthesis. *Plant Physiological Ecology* [e-journal], pp. 11-99. Available through: SpringerLink database [Accessed 18 January 2019].
- Lebourgeois, F. and Becker, M. (1996) 'Dendroecological study of corsican pine in western france. growth potential evolution during the last decades.', *Ann Sci Forest*, 53(5), pp. 931–946.
- Levin Kelly and Taryn, F. (2017) *World Resources Institute, Understanding the "Emissions Gap" in 5 Charts*. Available at: <http://www.wri.org> (Accessed: 21 March 2018).
- Li, G. *et al.* (2014) 'Simulation of tree ring-widths with a model for primary production, carbon allocation and growth', *Biogeosciences Discussions*, 11(7), pp. 10451–10485.
- Li, G., Harrison, S. P. and Prentice, I. C. (2016) 'A model analysis of climate and CO<sub>2</sub> controls on tree growth and carbon allocation in a semi-arid woodland', *Ecological Modelling*. Elsevier, 342, pp. 175–185.
- Liang, E., Shao, X., Eckstein, D. and Liud, X., 2010. Spatial variability of tree growth along a latitudinal transect in the Qilian Mountains, northeastern Tibetan Plateau. *Canadian Journal of Forest Research*, [e-journal], 40(2), pp. 200-211. Available through: Wiley Online Library database [Accessed 18 January 2019].
- Lindner, M. (2000) 'Developing adaptive forest management strategies to cope with climate change.', *Tree physiology*, 20(5\_6), pp. 299–307.
- Lindner, M. *et al.* (2010) 'Climate change impacts, adaptive capacity, and vulnerability of European forest ecosystems', *Forest Ecology and Management*, 259(4), pp. 698–709.
- Martínez-Vilalta, J. *et al.* (2008) 'Twentieth century increase of Scots pine radial growth in NE Spain shows strong climate interactions', *Global Change Biology*, 14(12), pp. 2868–2881.
- McKenzie, D., Hessel, E.A. and Peterson, L.D., 2001. Recent growth of conifer species of western North America: assessing spatial patterns of radial growth trends. *Canadian Journal of Forest Research*, [e-journal], 31(3), pp. 526-538. Available through: Canadian Journal of Forest Research database [Accessed 18 January 2019].
- Mendizábal, T. and Puigdefábregas, J., 2003. Population and Land use Changes: Impacts on Desertification in Southern Europe and in the Maghreb. *Security and Environment in the Mediterranean* [e-journal], pp. 687-701. Available through: SpringerLink database [Accessed 18 January 2019].
- Milad, M. *et al.* (2011) 'Forest Ecology and Management Climate change and nature conservation in Central European forests : A review of consequences , concepts and challenges', *Forest Ecology and Management*, 261(4), pp. 829–843.
- Milad, M., Schaich, H. and Konold, W. (2013) 'How is adaptation to climate change reflected in current practice of forest management and conservation? A case study from Germany', *Biodiversity and Conservation*. Springer Netherlands, 22(5), pp. 1181–1202.
- Miller, R., 2007. Western juniper field guide: Asking the right questions to select appropriate management actions. *USGS Science of a changing world*. Available at: <[https://www.researchgate.net/publication/292517239\\_Western\\_juniper\\_field\\_guide\\_Asking\\_the\\_right\\_questions\\_to\\_select\\_appropriate\\_management\\_actions](https://www.researchgate.net/publication/292517239_Western_juniper_field_guide_Asking_the_right_questions_to_select_appropriate_management_actions)> [Accessed 12 December 2018].
- Myneni, B.R., *et al.*, 1997. Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981 to 1991. *Nature*, [e-journal] 386, pp. 698–702. Available through: Nature database [Accessed 09 December 2018].

- Naidu, S. L. and Delucia, E. H. (1999) 'First-year growth response of trees in an intact forest exposed to elevated CO<sub>2</sub>', *Glob Chang Biol.* Wiley/Blackwell, 5(5), pp. 609–613.
- NASA, 2018. *GLOBAL LAND-OCEAN TEMPERATURE INDEX*. [image online] Available at: <https://climate.nasa.gov/vital-signs/global-temperature/> [Accessed 09 December 2018].
- NASA/GISS, 2018. *Temperature Difference*. [image online]. Available at: <https://climate.nasa.gov/vital-signs/global-temperature/> [Accessed 2 January 2019].
- Nemani, R., et al., 2003. Climate-Driven Increases in Global Terrestrial Net Primary Production from 1982 to 1999. *Science*, [e-journal] 300(5625), pp. 1560-1563. Available through: Science database [Accessed 09 December 2018].
- Nicolussi, K., Bortenschlager, S. and Körner, C. (1995) 'Increase in tree-ring width in subalpine *Pinus cembra* from the central Alps that may be CO<sub>2</sub>-related', *Trees*, 9(4), pp. 181–189.
- NOAA, 2016. *Temperatures Worldwide, 1901–2015*. [image online] Available at: <https://www.epa.gov/climate-indicators/climate-change-indicators-us-and-global-temperature> [Accessed 09 December 2018].
- Norby, et al., 1995. Productivity and compensatory response of yellow poplar trees in elevated CO<sub>2</sub>. *Nature* [e-journal] 357(6376), pp. 322,324. Available through: ResearchGate database [Accessed 29 December 2018].
- Norby, R. J. *et al.* (2005) 'Forest response to elevated CO<sub>2</sub> is conserved across a broad range of productivity', *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 102(50), pp. 18052–18056.
- NOAA, 2016. *Rate of Temperature Change in the United States, 1901–2015*. [image online]. Available at: <https://www.epa.gov/climate-indicators/climate-change-indicators-us-and-global-temperature> [Accessed 12 December 2018].
- Pan, Y. *et al.* (2011) 'A large and persistent carbon sink in the world's forests', *Science*, 333(6045), pp. 988–993.
- Penuelas, J. and Boada, M. (2003) 'A global change-induced biome shift in the Montseny mountains (NE Spain)', *Global Change Biology*. Wiley/Blackwell, 9(2), pp. 131–140.
- Perez-Garcia, J. *et al.* (2002) 'Impacts of Climate Change on the Global Forest Sector', *Climatic Change*. Kluwer Academic Publishers, 54(4), pp. 439–461.
- Peters, R. L. *et al.* (2015) 'Detecting long-term growth trends using tree rings: A critical evaluation of methods', *Global Change Biology*, 21(5), pp. 2040–2054.
- Phillips, O. L. (2009) 'Drought Sensitivity of the Amazon Rainforest Oliver L. Phillips', *science.sciencemag.org*, 1344.
- Picard, J. F. (1995) 'Évolution de la croissance radiale du hêtre (*Fagus silvatica* L) dans les Vosges. Premiers résultats sur le versant lorrain', *Annales des Sciences Forestieres*, 52(1), pp. 11–21.
- Piñol, J., Terradas, J. and Lloret, F. (1998) 'Climate warming, wildfire hazard, and wildfire occurrence in coastal eastern Spain', *Climatic Change*. Kluwer Academic Publishers, 38(3), pp. 345–357.
- Puigdefábregas, J. and Mendizabal, T. (1998) 'Perspectives on desertification: Western Mediterranean', *Journal of Arid Environments*. Academic Press, 39(2), pp. 209–224.
- Rambal, S. and Hoff, C. (1998) 'Mediterranean ecosystems and fire: the threats of global change', *Large forest fires*, pp. 187–213.

- Rathgeber, C. *et al.* (1999) 'Augmentation de productivité du chêne pubescent en région méditerranéenne française', *Annals of Forest Science*, 56(3), pp. 211–219.
- Reich, P.B. and Oleksyn, J., 2004. Global patterns of plant leaf N and P in relation to temperature and latitude. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, [e-journal] 101(30), pp.11001-11006. Available through: ResearchGate database [Accessed 09 December 2018].
- Rolland, C., Petitcolas, V. and Michalet, R. (1998) 'Changes in radial tree growth for *Picea abies*, *Larix decidua*, *Pinus cembra* and *Pinus uncinata* near the alpine timberline since 1750', *Trees - Structure and Function*, 13(1), pp. 40–53.
- Rozendaal, D. M. A. *et al.* (2010) 'Tropical tree rings reveal preferential survival of fast-growing juveniles and increased juvenile growth rates over time', *New Phytologist*, 185(3), pp. 759–769.
- Rustad, L., *et al.*, 2001. A meta-analysis of the response of soil respiration, net nitrogen mineralization, and aboveground plant growth to experimental ecosystem warming. *Oecologia*, [e-journal] 126(4) pp 543–562. Available through: SpringerLink database [Accessed 09 December 2018].
- Sarris, D., Christodoulakis, D., and Korner, C., 2007. Recent decline in precipitation and tree growth in the eastern Mediterranean. *Global Change Biology* [e-journal] 13(6), pp. 1187-1200. Available through: Wiley Online Library database [Accessed 11 January 2019].
- Sarris, D., Christodoulakis, D., and Korner, C., 2011. Impact of recent climatic change on growth of low elevation eastern Mediterranean forest trees. *Climatic Change* [e-journal] 106(2), pp. 203 – 223. Available through: SpringerLink database [Accessed 11 January 2019].
- Schöngart, J. *et al.* (2006) 'Climate-growth relationships of tropical tree species in West Africa and their potential for climate reconstruction', *Global Change Biology*. Wiley/Blackwell, 12(7), pp. 1139–1150.
- Schweingruber, F. H. (1996) *Tree rings and environment: dendroecology.*, *Tree rings and environment: dendroecology*. Paul Haupt AG Bern.
- Shirah, G., 2014. Early Spring Frost-Free Regions: Comparing 1950s and 2010s. [image online] Available at: <https://svs.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/details.cgi?aid=4154>[Accessed 09 December 2018].
- Silveira, J.M., Thiebaut, G., 2017. Impact of climate warming on plant growth varied according to the season. *Limnologica*, [e-journal] 65, pp.4-9. Available through: ScienceDirect database [Accessed 09 December 2018].
- Soulé, P. T. and Knapp, P. A. (2006) 'Radial growth rate increases in naturally occurring ponderosa pine trees: A late-20th century CO<sub>2</sub> fertilization effect?', *New Phytologist*, 171(2), pp. 379–390.
- Spittlehouse, D. L. and Stewart, R. B. (2003) 'Adaptation to climate change in forest management', *BC Journal of Ecosystems and Management*, 4(1), pp. 1–11.
- Sturrock, R. N. *et al.* (2011) 'Climate change and forest diseases', *Plant Pathology*, 60(1), pp. 133–149.
- Subedi, N. and Sharma, M. (2013) 'Climate-diameter growth relationships of black spruce and jack pine trees in boreal Ontario, Canada', *Global Change Biology*, 19(2), pp. 505–516.
- Tchakerian, P.V., 2015. HYDROLOGY, FLOODS AND DROUGHTS | Deserts and Desertification. Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences, [e-journal], pp. 185-192. Available through: ScienceDirect database [Accessed 18 January 2019].

- Tegel, W. et al. (2014) 'A recent growth increase of European beech (*Fagus sylvatica* L.) at its Mediterranean distribution limit contradicts drought stress', *European Journal of Forest Research*, 133(1), pp. 61–71.
- Teskey, et al., 1987. Physiology and genetics of tree growth response to moisture and temperature stress: an examination of the characteristics of loblolly pine (*Pinus taeda* L.). *Tree Physiology*. [e-journal], 32(1), pp. 41-61. Available through: Oxford Academic database [Accessed 18 January 2019].
- Tinner, W. et al. (2005) 'Fire ecology north and south of the Alps since the last ice age', *The Holocene*, 15(8), pp. 1214–1226.
- Tissue, D. T., Thomas, R. B. and Strain, B. R. (1997) 'Atmospheric CO<sub>2</sub> enrichment increases growth and photosynthesis of *Pinus taeda*: a 4 year experiment in the field', *Plant, Cell and Environment*. Wiley/Blackwell, 20(9), pp. 1123–1134.
- Tognetti, R., Cherubini, P. and Innes, J. L. (2000) 'Comparative stem-growth rates of Mediterranean trees under background and naturally enhanced ambient CO<sub>2</sub> concentrations', *New Phytologist*, 146(1), pp. 59–74.
- UNEP, 1995. *Precipitation changes: trend over land from 1900 to 1994*. [image online]. Available at: <<http://old.grida.no/climate/vital/18.htm>> [Accessed 2 January 2019].
- Vaganov, E. A., et al., 1999. Influence of snowfall and melt timing on tree growth in subarctic Eurasia. *Nature* [e-journal], 400, pp. 149-151. Available through: Nature database [Accessed 18 January 2019].
- Vila, B. et al. (2008) 'Has global change induced divergent trends in radial growth of *Pinus sylvestris* and *Pinus halepensis* at their bioclimatic limit? The example of the Sainte-Baume forest (south-east France)', *Annals of Forest Science*, 65(7), pp. 709–709.
- Voelker, S. L. et al. (2006) 'HISTORICAL CO<sub>2</sub> GROWTH ENHANCEMENT DECLINES WITH AGE IN QUERCUS AND PINUS', *Ecological Monographs*. Wiley-Blackwell, 76(4), pp. 549–564.
- Vogiatzis, D., and Petridou, K.M., 2003. *Biology of Horticultural Plants I – Growth and its Regulating Factors*. 2nd ed. Thessaloniki: Gartaganis Publications.
- von Felten, S. et al. (2007) 'Carbon allocation in shoots of alpine treeline conifers in a CO<sub>2</sub> enriched environment', *Trees*, 21(3), pp. 283–294.
- Vorovencii, I., 2015. Assessing and monitoring the risk of desertification in Dobrogea, Romania, using Landsat data and decision tree classifier. *Environmental Monitoring and Assessment*, [e-journal], 187(204). Available through: SpringerLink database [Accessed 18 January 2019].
- Wang, G. et al. (2006) 'Effect of natural atmospheric CO<sub>2</sub> fertilization suggested by open-grown white spruce in a dry environment', *Global Change Biology*. Wiley/Blackwell (10.1111), 12(3), pp. 601–610.
- Wang, X., Zhang, Y. and McRae, J.D., 2009. Spatial and age-dependent tree-ring growth responses of *Larix gmelinii* to climate in northeastern China. *Trees*, [e-journal], 23(4), pp. 875-885. Available through: SpringerLink database [Accessed 18 January 2019].
- Warrier, R. R. et al. (2013) 'Growth response of three plantation species of the tropics exposed to elevated CO<sub>2</sub> levels', *Journal of Forestry Research*. Springer Berlin Heidelberg, 24(3), pp. 449–456.
- Waterhouse, J. S. et al. (2004) 'Northern European trees show a progressively diminishing response to increasing atmospheric carbon dioxide concentrations', *Quaternary Science Reviews*,

23(7–8), pp. 803–810.

Watson, R. T. (2005) 'Turning science into policy: challenges and experiences from the science-policy interface.', *Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological sciences*. The Royal Society, 360(1454), pp. 471–7.

West, D. C. et al. (1993) 'Recent Growth Increases in Old-Growth Longleaf Pine', *Canadian Journal of Forest Research-Revue Canadienne De Recherche Forestiere*, 23(5), p. 846.

Wikipedia, 2018. *Pinus longaeva distribution map*. [image online] Available at: [https://en.wikipedia.org/wiki/Pinus\\_longaeva](https://en.wikipedia.org/wiki/Pinus_longaeva) [Accessed 12 December 2018].

Williams, et al., 1986. The response of plants to elevated CO<sub>2</sub> IV. Two deciduous-forest tree communities. *Oecologia* [e-journal] 69(3), pp. 454 – 459. Available through: SpringerLink database [Accessed 29 December 2018].

Wu, Z., et al., 2011. Responses of terrestrial ecosystems to temperature and precipitation change: a meta-analysis of experimental manipulation. *Global Change Biology*, [e-journal] 17(2), pp. 927-942. Available through: Wiley Online Library database [Accessed 10 December 2018].

Xiong, J. and Bauer, E. C., 2002. Complex Evolution of Photosynthesis. *Annual Review of Plant Biology* [e-journal], 53, pp. 503-521. Available through: Annual Reviews database [Accessed 18 January 2019].

Yank, H., et al., 2011. Plant community responses to nitrogen addition and increased precipitation: the importance of water availability and species traits. *Global Change Biology*, [e-journal] 17(9), pp. 2936-2944. Available through: Wiley Online Library database [Accessed 10 December 2018].

Zhang, H. et al., 2015. Biogeographical patterns of biomass allocation in leaves, stems, and roots in China's forests. *Scientific Reports* [e-journal], Available through: Nature database [Accessed 18 January 2019].

Zuidema, P. A., Vlam, M. and Chien, P. D. (2011) 'Ages and long-term growth patterns of four threatened Vietnamese tree species', *Trees - Structure and Function*, [e-journal] 25(1), pp. 29–38. Available through: SpringerLink database [Accessed 29 December 2018].