



Modelització climàtica mitjançant tècniques SIG i la seva aplicació a l'anàlisi quantitativa de la distribució d'espècies vegetals a l'Espanya peninsular

Miquel Ninyerola Casals

Universitat Autònoma de Barcelona

Setembre de 2000

Modelització climàtica mitjançant tècniques SIG i la seva aplicació a l'anàlisi quantitativa de la distribució d'espècies vegetals a l'Espanya peninsular

Memòria per optar al grau de doctor presentada per Miquel Ninyerola Casals i dirigida per:

Dr. Xavier Pons i Fernández

Departament de Geografia (Facultat de Lletres) i Centre de Recerca Ecològica i Aplicacions Forestals (CREAF)

Universitat Autònoma de Barcelona

Dr. Joan M. Roure i Nolla

Unitat de Botànica

Departament de Biologia Animal, Biologia Vegetal i Ecologia

Facultat de Ciències

Universitat Autònoma de Barcelona

A la que ja ha vingut i que tantes ganes tenim de seguir coneixent...

Agraïments

Vull exposar la meua gratitud a les persones o entitats que, per un motiu o altre, s'han creuat amb aquesta memòria de recerca.

Als que van gestar el projecte (els meus directors):

Professors Joan M. Roure i Xavier Pons per ser uns meravellosos directors. El primer ha aportat els seus dilatats coneixements sobre la vegetació ibèrica i la seva relació amb el clima, cosa que ha permès enfocar la tesi en una direcció molt interessant. També li agraeixo el seu suport logístic i l'excel·lent tracte personal que m'ha permès disposar d'uns mitjans de treball excel·lents. El segon, ha aportat la seva impressionant capacitat de recerca científica i sentit comú tot desenvolupant moltes de les idees més brillants incloses en aquest treball. No oblidó tampoc les seves aportacions de *software* (a banda de MiraMon) que han permès solucionar problemes altrament insolubles.

Als que han aportat les dades (i que per tant han permès que les idees es plasmessin):

- Personal del Servicio de Inventario Forestal i en especial al seu director Sr. José A. Villanueva, per cedir-me amablement les seves dades amb una actitud molt positiva que permet el desenvolupament d'estudis científics sense ànim de lucre.
- Departament de Medi Ambient (DMA) de la Generalitat de Catalunya per la seva predisposició a aportar dades climatològiques.
- Sr. Carlos Almarza (Jefe de la Sección de Climatología del INM) per ajudar-me en un moment difícil.
- Prof. Josep Pinyol per ajudar-me a aconseguir més dades de radiació solar.

Als que han aportat ajuts de caire acadèmic (els seus coneixements i consells han tret imperfeccions durant el procés de plasmació de les idees):

- Prof. Javier Martín Vide pels seus consells i interès en el seguiment d'aquest treball.

- Prof. Angel M. Felicísimo per la inspiració que han proporcionat els seus treballs com també per l’aportació d’algunes de les dades utilitzades.
- Dr. Raimon Salvador pels seus valuosos consells estadístics com també per deixar-me usar algun dels seus programes.

Als que han aportat ajudes tècniques:

- Personal de la Unitat de Botànica que tan bé s'ha portat oferint-me la possibilitat d'incrementar la meva dedicació (reducció de tasques docents) per poder acabar aquest projecte a temps. També agraeixo els consells encaminats a solucionar els problemes de *hardware* durant la setmana tràgica (mort de dos ordinadors en menys d’una setmana).
- Jordi Cristóbal i Daniel Villero per la seva col·laboració en determinats aspectes del treball i, particularment, en la contra rellotge final. Hem passat junts un feliç estiu del 2000 durant el qual hem travat una bona amistad.
- Prof. Joan Masó pel seu suport en qüestions informàtiques (sense oblidar el seu gran sentit de l’humor) i en general als programadors incansables del projecte MiraMon.
- Personal del Centre de Recerca Ecològica i d’Aplicacions Forestals (CREAF) per ajuts puntuals.
- Prof. Agustí Lledós, per oferir-me la possibilitat de llençar alguns dels càlculs que altrament haurien estat més lents.
- Jordi Porteros per les seves aportacions inicials a aquest llarg camí.

Als que han aportat ajudes íntimes:

- Ada Barea (la meva inseparable) pel seu recolzament tant a nivell temporal (mantenir a ratlla a la petita Duna) com atemporal i per aplicar algunes “interessants” correccions lingüístiques.

Seria un sofisme agrair a la meva filla el seu ajut en aquest treball.

Als amics:

- Dr. Jordi Moya pel seu ininterromput interès per tot el que faci olor a ciència.
- En general a la gent que m'envolta i que constantment ha ofert d'ajudar-me desinteressadament o simplement ha mostrat interès en el projecte.

Als que han aportat emocions fortes:

- Mr. Murphy (Catedràtic del Departament de Probabilitat i Estadística de la Universitat de Randoom) la seva aportació durant la setmana tràgica.

Als qui em van gestar a mi:

- Gabriela i Rafel.

Finalment, vull estacar que les múltiples peticions que hem rebut per part de diversos investigadors per utilitzar la informació continguda en els mapes generats per a Catalunya han incrementat les ganes i l'interès de continuar en aquesta línia de recerca.

ÍNDIX

1. INTRODUCCIÓ I OBJECTIUS	3
1.1. INTRODUCCIÓ	3
1.1.1. Antecedents	4
1.1.2. Estructura del present treball	5
1.1.3. La modelització climàtica	6
1.1.4. Aspectes climàtics generals.....	13
1.1.5. La climatologia en aquest estudi	15
1.1.6. Algunes nocions de SIG.....	17
1.1.7. El paper dels SIG a la fitogeografia.....	18
1.1.8. Modelització de la distribució de les espècies vegetals	20
1.2. OBJECTIUS	25
1.3. SÍNTESE DE LA METODOLOGIA EMPRADA.....	26
2. MODELITZACIÓ CLIMÀTICA A L'ESPANYA PENINSULAR.....	29
2.1. ÀREA D'ESTUDI	29
2.1.1. Aspectes climàtics rellevants de la Península Ibèrica	33
2.2. MATERIAL I MÈTODES	35
2.2.1. Elecció del mètode d'interpolació espacial.....	35
2.2.2. Elements climàtics o variables dependents	36
2.2.2.1. Descripció i processament de les dades originals de les estacions meteorològiques	36
2.2.2.2. Elecció de les variables dependents.....	38
2.2.2.3. Filtratge de les dades	39
2.2.2.4. La qualitat de les dades	43
2.2.2.5. Descripció de les dades processades.....	44
2.2.3. Factors climàtics o variables independents	45
2.2.3.1. Elecció de les variables independents	45
2.2.3.2. Obtenció de les variables independents.....	48
2.2.3.2.1. Orografia	48
2.2.3.2.2. Latitud.....	51
2.2.3.2.3. Continentalitat.....	51
2.2.3.2.4. Radiació solar potencial.....	53
2.2.4. Elecció del model de regressió	65
2.2.5. Ajust i validació del model abans de la correcció	67
2.2.6. Algunes consideracions sobre l'anàlisi de regressió.....	67
2.2.7. Cartografia derivada del model.....	68
2.2.8. Elaboració dels correctors per refinar el model.....	69
2.2.9. Significació dels mapes d'anomalies.....	70

2.2.10. Limitacions del model a l'extrapolació.....	71
2.2.11. Comparació de distints mètodes d'interpolació.....	72
2.2.11.1. Interpolació dels correctors.....	72
2.2.11.2. Comparació del model de regressió amb altres interpoladors.....	73
2.2.11.3. Comparació del model de regressió amb el mètode clàssic de traçat manual d'isolínies.....	73
2.3. RESULTATS I DISCUSSIÓ.....	74
2.3.1. Elecció i validació del millor model predictiu.....	74
2.3.1.1. Temperatura mitjana de les mínimes.....	75
2.3.1.2. Temperatura de les mitjanes.....	76
2.3.1.3. Temperatura mitjana de les màximes.....	77
2.3.1.4. Precipitació.....	78
2.3.2. Els mapes de correctors.....	79
2.3.3. El model real.....	80
2.3.3.1. Temperatura mitjana de les mínimes.....	81
2.3.3.2. Temperatura mitjana.....	82
2.3.3.3. Temperatura mitjana de les màximes.....	82
2.3.3.4. Precipitació.....	83
2.3.4. Significació estadística del model escollit.....	83
2.3.4.1. Temperatura mitjana de les mínimes.....	84
2.3.4.2. Temperatura de les mitjanes.....	85
2.3.4.3. Temperatura mitjana de les màximes.....	85
2.3.4.4. Precipitació.....	86
2.3.5. Comparació amb altres mètodes d'interpolació.....	87
2.3.5.1. Temperatures mitjanes de les mínimes.....	88
2.3.5.2. Temperatures mitjanes.....	88
2.3.5.3. Temperatures mitjanes de les màximes.....	88
2.3.5.4. Precipitació.....	88
2.3.6. Comparació amb el mètode clàssic de traçat manual d'isolínies.....	89
2.3.6.1. Temperatura de les mitjanes.....	89
2.3.6.2. Precipitació.....	96
3. MODELITZACIÓ CLIMÀTICA A CATALUNYA.....	107
3.1. ÀREA D'ESTUDI.....	107
3.1.1. Aspectes climàtics rellevants de Catalunya.....	108
3.2. MATERIAL I MÈTODES.....	109
3.2.1. Elecció del mètode d'interpolació espacial.....	109
3.2.2. Elements climàtics o variables dependents.....	109
3.2.2.1. Descripció i processament de les dades originals de les estacions meteorològiques.....	109
3.2.2.2. Elecció de les variables dependents.....	110
3.2.2.3. Filtratge de les dades.....	110
3.2.2.4. Descripció de les dades processades.....	110
3.2.3. Factors climàtics o variables independents.....	111
3.2.3.1. Elecció de les variables independents.....	111

3.2.3.2. Obtenció de les variables independents.....	111
3.2.3.2.1 Altitud i latitud.....	111
3.2.3.2.2 Continentalitat.....	111
3.2.3.2.3 Radiació solar real i nuvolositat.....	111
3.2.4. <i>Elecció del model de regressió</i>	122
3.2.5. <i>Comparació de metodologies</i>	123
3.2.5.1. Interpolació dels correctors.....	123
3.2.5.2. Comparació del model de regressió amb altres interpoladors.....	123
3.2.5.3. Comparació del model de regressió amb el mètode clàssic de traçat manual d'isolinies.....	123
3.3. RESULTATS I DISCUSSIÓ.....	125
3.3.1. <i>Temperatura mitjana de l'aire</i>	125
3.3.2. <i>Temperatura mitjana de les mínimes i temperatura mitjana de les màximes</i>	126
3.3.3. <i>Precipitació</i>	127
3.3.4. <i>Comparació amb altres mètodes d'interpolació</i>	129
3.3.5. <i>Comparació amb el mètode clàssic de traçat manual d'isolinies</i>	129
3.3.5.1. Temperatura de les mitjanes.....	130
3.3.5.2. Precipitació.....	130
4. MODELITZACIÓ DE LA DISTRIBUCIÓ POTENCIAL DE LES ESPÈCIES VEGETALS A L'ESPANYA PENINSULAR.....	134
4.1. ÀREA D'ESTUDI.....	134
4.1.1. <i>Aspectes biogeogràfics i botànics rellevants de la Península Ibèrica</i>	135
4.2. MATERIAL I MÈTODES.....	137
4.2.1. <i>Elecció de la metodologia</i>	137
4.2.2. <i>Les dades corològiques</i>	137
4.2.2.1. Elecció i descripció de les dades originals.....	137
4.2.2.2. Elecció dels tàxons vegetals.....	139
4.2.2.3. Filtratge i processament de les dades.....	140
4.2.2.4. Qualitat de les dades.....	141
4.2.3. <i>Les dades geoclimàtiques</i>	141
4.2.3.1. Elecció de les variables susceptibles d'influenciar les espècies vegetals.....	142
4.2.3.2. Obtenció de les dades geoclimàtiques.....	146
4.2.4. <i>Caracterització numèrica (quadre d'exigències)</i>	147
4.2.5. <i>Cartografia derivada del model</i>	149
4.2.6. <i>Comparació amb altres metodologies</i>	151
4.2.6.1. <i>Mapa de series de vegetación de España</i>	152
4.2.6.2. Classificació bayessiana.....	154
4.3. RESULTATS I DISCUSSIÓ.....	156
4.3.1. <i>Quadres d'exigències</i>	156
4.3.2. <i>Mapes de distribució potencial de les espècies vegetals</i>	157

5. MODELITZACIÓ DE LA DISTRIBUCIÓ POTENCIAL DE LES ESPÈCIES VEGETALS A CATALUNYA.....	160
5.1. ÀREA D'ESTUDI	161
5.1.1. Aspectes biogeogràfics i botànics rellevants de Catalunya.....	161
5.2. MATERIAL I MÈTODES.....	162
5.3. RESULTATS I DISCUSSIÓ.....	162
6. CONCLUSIONS GENERALS	164
6.1. CLIMATOLOGIA	164
6.2. FITO GEOGRAFIA	167
BIBLIOGRAFIA	181
LLISTAT D'ABREVIACIONS	197
LLISTAT DE SOFTWARE	201

CAPÍTOL 1

INTRODUCCIÓ I OBJECTIUS

1. Introducció i objectius

1.1. Introducció

Partint d'un Model Digital d'Elevacions (MDE) i de les dades de les estacions meteorològiques de la Península Ibèrica hem desenvolupat un model d'interpolació espacial basat en tècniques multivariants d'anàlisi de regressió combinades amb eines típiques d'un Sistema d'Informació Geogràfica (SIG). Podem parlar d'interpolació estadística en el sentit que s'utilitzen aquestes tècniques com a interpoladores. També s'han revisat i millorat els models climàtics de Catalunya desenvolupats en treballs precedents (Ninyerola *et al.*, en premsa). Aquesta metodologia d'interpolació estadística ha estat comparada amb tècniques d'interpolació que no utilitzen informació geogràfica en els càlculs. També hem comparat els resultats obtinguts a partir del nostre model (objectiu i numèric) vers els models tradicionals que utilitzen les línies de contorn per representar la informació climàtica.

Les variables interpolades, que intervenen en el model de regressió múltiple com a variables dependents, han estat la temperatura mitjana, la temperatura mitjana de les màximes, la temperatura mitjana de les mínimes i la precipitació. La informació geogràfica utilitzada (variables que intervenen en el model de regressió com a variables independents) inclou l'orografia, la continentalitat, la latitud i la radiació solar o la nuvolositat. Totes aquestes variables, com es veurà més endavant, es poden obtenir a partir d'un MDE o es poden elaborar utilitzant eines SIG. És important destacar que la informació necessària per elaborar el model no és excessivament difícil d'aconseguir en el sentit que és informació que actualment hom pot adquirir o elaborar. El resultat final consisteix en un conjunt de mapes digitals i objectius que tenen una resolució espacial de 200 metres (180 pel cas de Catalunya) i una resolució temporal mensual i anual per a cada una de les variables dependents. Una vegada desenvolupats els mapes climàtics hem realitzat una anàlisi quantitativa de la vegetació. Basant-nos en aquesta informació climàtica hem elaborat una caracterització numèrica dels rangs ecològics (quadres

1. Introducció i objectius

d'exigències) per a les principals espècies arbòries (i algunes arbustives) de la Península Ibèrica i Catalunya. A partir d'aquests quadres d'exigències i usant tècniques d'àlgebra de mapes, hem generat mapes digitals de distribució potencial de la vegetació expressats en termes de la idoneïtat que té cada una de les espècies estudiades de pertànyer a una determinada cel·la de la mateixa resolució que la dels mapes climàtics. Aquestes idoneïtats ens donaran una idea de la potencialitat per a cada una dels 14 milions de tesselles estudiades.

Tant el model climàtic com el de distribució potencial de la vegetació (numèrics i objectius) han estat comparats amb els obtinguts a través de mètodes tradicionals (basats en el coneixement del territori, però més subjectius) emprats en les respectives disciplines científiques.

Tot i que es tracta d'un treball fonamentalment metodològic, els resultats obtinguts contenen una informació que pot ser molt interessant per a la major part de les ciències de la Terra. La major part dels esforços, però, han estat dirigits a desenvolupar, comparar, validar, automatitzar i aplicar aquesta metodologia d'interpolació i predicció espacial, més que no a aprofundir en la interpretació dels mapes finals, tasca que deixem per a futurs treballs.

1.1.1. Antecedents

Per situar al lector parlarem, primerament, dels treballs que precedeixen a aquesta memòria. La maduració d'aquests estudis precursors, com també els bons resultats obtinguts, ens portaren a desenvolupar la present memòria. Hi ha dues etapes que val la pena destacar. La primera, i origen del plantejament, la constitueixen les provatures fetes a la unitat de Botànica de la UAB, l'any 1993, sobre una idea del Prof. Xavier Pons que parteix del model de radiació solar potencial que ell mateix desenvolupà (Pons, 1996b). Aquest model, a més de moltes altres aplicacions que més endavant comentarem, permetia abordar una modelització climàtica mitjançant tècniques estadístiques i eines típiques d'un SIG. Les altres variables que potencialment influeixen en el clima podien ser obtingudes de forma relativament senzilla, cosa que no succeïa en

el cas de la radiació solar. Aquest model, basat en un MDE, permetia completar el que seria un conjunt interessant de variables per abordar una modelització climàtica. La segona etapa comprèn el meu treball de recerca (Ninyerola, 1997) on cristal·litzaren moltes de les provatures inicials i es desenvoluparen noves tècniques. En aquest cas es millorà el model de radiació solar potencial i s'abordà la modelització de la radiació solar real utilitzant dades de les estacions meteorològiques per a calibrar el model potencial. S'acabaren de perfilar les variables que intervenen en el model climàtic i la longitud més òptima de les sèries. Finalment, es desenvoluparen els models, amb molt bons resultats, que posteriorment es revisaren i milloraren (Ninyerola *et al.*, en premsa). L'àmbit geogràfic escollit fou el de Catalunya, ja que semblava un territori interessant per posar a punt la metodologia desenvolupada. Es tracta del nostre territori i presenta una interessant heterogeneïtat tant a nivell climàtic com botànic. L'esforç per obtenir les dades inicials, com també el volum d'informació obtingut i el treball a realitzar, semblaren adequats per aquella memòria.

1.1.2. Estructura del present treball

A diferència dels treballs precedents, aquesta memòria introdueix aspectes fitogeogràfics ja que la informació climàtica ha estat encreuada amb informació corològica de distintes espècies vegetals. Per tant, podem dividir aquesta memòria en dos grans blocs:

- **Climatologia**, on s'obtenen uns mapes per interpolació de les estacions meteorològiques i es comparen distintes metodologies d'interpolació.
- **Anàlisi de la distribució de la vegetació**, on es modelitza la vegetació potencial a partir de dades de vegetació actual i es compara amb tècniques tradicionals.

Podem ubicar aquest treball, doncs, a cavall entre les disciplines de la climatologia, la fitoclimatologia i la fitogeografia.

Tant el bloc de la climatologia com el de l'anàlisi de la vegetació han estat desenvolupats de forma simètrica per a dos àmbits geogràfics distintes. En la discussió

donarem prioritat als models centrats en la Península Ibèrica per ser els aspectes més innovadors i que més volum de feina han comportat durant aquest estudi. Tot i que els models climàtics de Catalunya precedeixen temporalment als desenvolupats per a la Península Ibèrica, només destacarem les particularitats i diferències, quan sigui necessari, pel cas de Catalunya.

Els bons resultats obtinguts, com es veurà, per als models climàtics de Catalunya, ens animà a aplicar aquesta metodologia a l'àmbit peninsular. Estrictament parlant, però, no podem parlar d'una modelització a nivell de tota la Península Ibèrica a causa de la manca de dades de Portugal. Malgrat els esforços realitzats per aconseguir dades climàtiques de Portugal (incloent la visita personal a l'Institut de Meteorologia a Lisboa) ha estat impossible recopilar, si més no amb els recursos econòmics ja invertits en les dades de la resta del territori, res més que un conjunt de dades d'articles i llibres. Així doncs, tot i que aquestes dades de Portugal poden ajudar a calibrar el nostre model, hem de parlar d'una modelització a nivell de l'Espanya peninsular. Òbviament, des d'un punt de vista climàtic i fitològic, l'ideal seria tractar la Península Ibèrica com un tot i, per tant, esperem que en futurs treballs tinguem l'ocasió de poder obtenir dades d'aquesta porció peninsular que ens manca per millorar els models en tota la superfície peninsular.

1.1.3. La modelització climàtica

La climatologia és, dins el que hom entén per ciències de la Terra, una de les disciplines que tenen més importància sobre la resta ja que és la base per a poder entendre el comportament de múltiples fenòmens, tant biòtics com abiòtics. Molts camps de la ciència, ja sigui a nivell teòric o aplicat (biogeografia, hidrologia, enginyeria forestal, agricultura, ecologia i d'altres), usen informació espacial climàtica com a base per comprendre o millorar els processos que estudien. Uns bons exemples els trobem en l'interès de la enginyeria pels mapes de radiació solar (emplaçament de centrals solars), de la hidrologia per la precipitació (gestió dels recursos hídrics) i de la temperatura en biogeografia. En general, una bona cartografia climàtica és una eina de gran utilitat per

incrementar el coneixement del medi físic del país i, per tant, per a millorar la gestió dels seus recursos.

Aquest interès que tenen els aspectes climàtics per a diferents disciplines queda reflectit en la forta dispersió en la literatura de la informació referent a models climàtics. Una clara constatació d'aquest fet ha estat l'article de Lennon i Turner (1995) que hem trobat en una revista d'ecologia animal (*Journal of Animal Ecology*). Destaquem aquest article perquè és el treball detectat que més s'apropa a la metodologia emprada per nosaltres i que, lògicament, citarem amb major deteniment més endavant.

La informació climàtica disponible està limitada normalment a les estacions meteorològiques i, per tant, a punts discrets en l'espai. Aquest fet comporta que sigui necessari desenvolupar tècniques d'interpolació per cartografiar les corresponents variables meteorològiques. El problema d'obtenir predictors espacials acurats a partir de les dades observades es comú en la majoria de disciplines científiques (Cressie, 1993). L'interès general de la interpolació espacial conjuntament amb el climàtic contribueixen a la dispersió bibliogràfica abans esmentada.

Tradicionalment, els mètodes utilitzats per interpolació discreta en l'espai ha estat la interpolació lineal entre estacions i el traçat d'isolínies basades en el coneixement de l'investigador sobre l'àrea d'estudi (Burrough i McDonnell, 1998). Com a estudis pioners al nostre país podem esmentar entre d'altres l'*Atlas pluviomètric de Catalunya* de Febrer (1930) i els mapes de precipitació de la meitat oriental dels Pirineus de Gausson (1926). Cal destacar el paper jugat per les distintes administracions en el desenvolupament de la cartografia física del país utilitzant aquesta metodologia. Volem citar, en aquest punt, l'*Atlas climático de España* de Font Tullot realitzat des de l'Institut Nacional de Meteorología (1983b) i el relativament recent *Atlas climático de Catalunya* de Clavero, Martín Vide i Raso (1996) publicat per l'Institut Cartogràfic de Catalunya i el Departament de Medi Ambient de la Generalitat de Catalunya, com a excel·lents síntesis que utilitzen línies de contorn.

Conjuntament amb l'assentament generalitzat de les computadores, s'han desenvolupat sistemes d'interpolació automàtica. Aquests procediments d'interpolació poden ser purament matemàtics (invers de la distància amb un determinat pes, superfícies de

tendència, polígons de Thiessen, *thin plate splines*, etc.) o models de major complexitat en el sentit que inclouen informació addicional al sistema (mètodes geostatístics com per exemple el *kriging* i les seves variants). Malgrat tot, en la majoria de casos, aquests models no tenen en compte informació geogràfica addicional. Dins el camp de la geostatística espacial s'han desenvolupat mètodes més sofisticats que sí que ho fan, com per exemple el *co-kriging* o l'*elevation-detrended kriging* (Phillips *et al.*, 1992).

Dins del camp de la interpolació climàtica basada en interpoladors estrictament matemàtics podem citar el treball de Hamilton (1988), el qual utilitza la tècnica de McLain (1974), basada en superfícies de tendència, per interpolat la temperatura, la precipitació i la insolació. Segons Hamilton (1988) i Daley (1991) les superfícies de tendència s'adeqüen bé si la interpolació es fa sobre un conjunt dens de punts però en cas contrari cal cercar mètodes més acurats. Aquesta constatació es vàlida per a la majoria de tècniques d'interpolació ja que els problemes existeixen realment quan hom vol interpolat punts esparsos (Burrough i McDonell, 1998). Com veurem a l'apartat 2.2.2.3 és fàcil que els punts a interpolat (en el nostre cas les estacions meteorològiques) no estiguin ben repartides en l'espai. És lògic, per tant, que s'hagin desenvolupat mètodes per a millorar la interpolació espacial tot introduint, com ja hem dit, informació addicional al sistema.

El *kriging*, desenvolupat per a l'anàlisi espacial en el camp de la mineria, introdueix el concepte de que la variabilitat espacial d'una variable és massa irregular per ser modelitzada per una funció matemàtica simple. Els pesos assignats a les dades properes al punt problema són optimitzats per a interpolat el valor d'aquest punt. Es té en compte, doncs, l'estructura espacial de les dades mitjançant la figura del semivariograma (Journel i Huijbregts, 1978; Isaaks i Srivastava, 1989). Uns bons exemples d'interpolació climàtica via *kriging* són el treball de Hudson i Wackernagel (1994) on s'aplica aquesta tècnica per modelitzar la temperatura de l'aire i el de Bigg (1991) que utilitza el *kriging* per a estudiar la variabilitat espacial de la precipitació a distintes escales temporals. Oliver *et al.* (1990) implementen aquestes tècniques en un SIG.

Si bé en el nostre treball també utilitzem l'invers de la distància i el *kriging* en determinats moments (vegeu l'apartat 2.2.8), el nostre interès està centrat sobretot en la interpolació utilitzant els factors que modelen el clima. No només trobem mètodes geoestadístics com el *co-kriging* (Phillips *et al.*, 1992; Hevesi *et al.*, 1992 i Ishida i Kawashima, 1993) sinó que s'han desenvolupat mètodes mixtos a partir d'interpoladors estrictament matemàtics (invers de la distància al quadrat o *kriging*). Cal esmentar la recerca de Hutchinson (1995), que usa l'orientació i l'altitud per millorar la interpolació mitjançant *splines*. En el camp de la interpolació estadística, Chessa i Delitala (1997) incorporen la distància al mar amb bons resultats.

És precisament l'aplicació de tècniques estadístiques (basades en l'anàlisi de regressió múltiple) per a la interpolació un dels objectius principals d'aquest treball. Concretament, hem utilitzat l'anàlisi de regressió múltiple com a interpolador combinat amb mètodes que no incorporen informació geogràfica (vegeu l'apartat 2.2.1). Si bé existeixen estudis que utilitzen la regressió per interpolar, només el treball de Lenonn i Turner (1995) aplica un mètode combinat similar al nostre. Altres treballs orientats cap a la interpolació estadística els podem trobar en Basist *et al.* (1994) i Daly *et al.* (1994). Ambdós treballs utilitzen la topografia per a modelar la precipitació. Blennow (1998) utilitza aquesta tècnica per a predir la temperatura mínima de l'aire.

La proliferació de treballs en què es relacionen les variables climàtiques amb les geogràfiques ha contribuït a la possibilitat de desenvolupar mètodes d'interpolació estadístics. En realitat existeix un enriquiment bidireccional entre el coneixement del funcionament climàtic i la interpolació estadística ja que també els resultats obtinguts en el segon cas serveixen per alimentar el coneixement climàtic d'una determinada àrea. Cal tenir molt en compte, però, que mitjançant una anàlisi de regressió és poden indagar les relacions existents entre diverses variables, però mai assegurar quins són els mecanismes causals subjacents (StatSoft, 1995). Trobem interessants articles com els d'Egido *et al.* (1985) i Hernández *et al.* (1975) que apliquen l'anàlisi de regressió per predir la precipitació. Existeix força tradició en la predicció estadística de les variables climàtiques. White (1979), per exemple, ja utilitzà en el seu treball d'interpolació climàtica tècniques estadístiques. Driscoll i Yee Fong (1992) utilitzen una metodologia similar per predir la continentalitat en funció de la latitud. Estudis de correlacions i

1. Introducció i objectius

correlacions creuades com el de Berndtsson (1987 i 1989) són interessants per comprendre millor la relació entre el clima i la geografia. Kuye i Jagtap (1994) també estudien la correlació existent entre la radiació solar i diversos paràmetres físics i climàtics.

També volem destacar els treballs de comparació de metodologies com el de Phillips *et al.* (1992) on es compara el *kriging* amb el *co-kriging* observant millores en aquesta última quan la correlació entre la precipitació i l'altitud és alta. Bolstad *et al.* (1998) i Lennon i Turner (1995) també comparen distintes metodologies d'interpolació espacial.

Existeixen altres vessants de la interpolació climàtica que no hem abordat, tot i que en alguns casos no descartem utilitzar alguna d'aquestes tècniques per millorar els models de regressió. D'una banda, tenim els models físics que incorporen informació del comportament dinàmic de l'atmosfera. Per exemple, Thompson *et al.* (1997) i Sinclair (1994) modelitzen el vent i l'orografia per a predir la precipitació. Si bé els models físics poden aportar interessants millores als seus resultats sovint s'allunyen més de la realitat que el models estadístics a causa de la difícil modelització de determinades variables i de la manca de dades per validar aquests models. D'altra banda, tenim la utilització d'imatges satèl·lit sempre i quan es pugui obtenir informació de les variables per interpolació de les variables climàtiques. D'Agostino i Zelenka (1992) interpolen la radiació solar utilitzant les imatges satèl·lit com a covariable en un anàlisi de *co-kriging*. Menz (1997) usa l'anàlisi de regressió i les dades del Meteosat per a predir la precipitació. Finalment, Vogt *et al.* (1997) utilitzen una tècnica similar a l'anterior treball però, aplicada a la temperatura mitjana de les màximes.

La mateixa necessitat que ens porta a desenvolupar metodologies d'interpolació ens condueix al desenvolupament de mètodes de cartografiat d'aquest models. Malgrat que en alguns dels articles citats és mostren intents de cartografiat, en pocs d'ells trobem implícita una mentalitat de SIG per poder consultar i representar la informació (Hallett i Jones, 1993).

La utilització de SIG en la interpolació climàtica és present en força treballs sovint com a eina per modelitzar algunes variables concretes, però creiem que està poc explotada la combinació d'interpolació climàtica amb la utilització d'un SIG com a eina per proveir i

tractar les dades, consultar i representar els models obtinguts. Un exemple de la utilització d'eines SIG en climatologia pot ser trobada a Blennow i Persson (1998) i en Blennow (1998) on aquestes tècniques són usades per obtenir les variables independents (proporció de volta celest visible a partir d'un MDE, altitud, etc). Chuvieco i Salas (1996) també usen SIG i regressió múltiple, però el seu estudi es restringeix a modelar la temperatura màxima de l'aire durant els mesos d'estiu ja que el seu objectiu és obtenir un índex de risc d'incendi. Hutchinson (1995) usa SIG per a representar els seus models, però incideix més en els aspectes d'interpolació que en la implementació SIG.

El nostre principal propòsit és desenvolupar una cartografia objectiva (i per tant basada en tècniques numèriques) mitjançant un mètode d'interpolació que tingui en compte variables geogràfiques, i utilitzar tècniques de SIG per obtenir uns mapes finals de variables climàtiques sobre una àrea relativament gran. La idea d'un cartografiat objectiu la podem trobar a Chessa i Delitala, (1997); Hargy, (1997); Hamilton *et al.*, (1988); White i Smith, (1982); Daly *et al.* (1994); Lennon i Turner (1995) i Creutin i Obled (1982).

L'ús de mètodes d'interpolació integrats en SIG poden millorar aquestes tècniques per elaborar un mapa objectiu. Alguns dels treballs citats al llarg d'aquest introducció presenten els resultats en forma de mapes, tot i que sovint molt simples. Es el cas dels mapes d'isolínies (obtinguts a partir d'interpolacions numèriques) d'Egido *et al.* (1985) Thompson *et al.* (1997) Chessa i Delitala (1997). Hutchinson (1995) ja hem dit que utilitza tècniques SIG però no produeix mapes al igual que succeeix a Blennow (1998).

De la literatura consultada observem que els treballs que més s'aproximen a la nostra línia de recerca son els de Hargy (1997) i Lennon i Turner (1995) en el sentit que integren mètodes estadístics (interpolació mitjançant regressió múltiple) en un SIG amb producció de cartografia. El primer estudi està centrat exclusivament en la modelització de la temperatura acumulada. En el segon estudi, els autors utilitzen una metodologia molt similar a la nostra però amb una malla de resolució de 5 km. Si bé interpolen les temperatures mitjanes diàries no desenvolupen els models per a les temperatures extremes ni la precipitació.

1. Introducció i objectius

Existeixen dos treballs molt recents lligats a les administracions estatals que reflecteixen l'interès creixent d'aquesta metodologia. Sánchez Palomares *et al.* (1999) des de l'administració espanyola, usen aproximacions similars a la nostra tot i que no modelitzen les temperatures mitjanes de les mínimes ni de les màximes i només utilitzen l'altitud i les coordenades X ,Y de les estacions com a variables independents. Thompson *et al.* (1998), des de l'administració nordamericana, també utilitzen l'altitud i la posició en X i Y com a predictors, basant-se en treballs d'altres autors.

En el present treball s'ha desenvolupat una metodologia empírica i estadística per predir els següents elements climàtics a nivell mensual i anual:

- **Temperatura mitjana de les mínimes** (a l'Espanya peninsular)
- **Temperatura mitjana** (a la Península Ibèrica)
- **Temperatura mitjana de les màximes** (a l'Espanya peninsular)
- **Precipitació** (a la Península Ibèrica)

Aquesta metodologia és empírica perquè usa dades obtingudes a partir de les estacions meteorològiques per construir i validar el model. Tanmateix, aquest procediment és estadístic perquè està basat en una anàlisi de regressió múltiple i la seva corresponent validació. Com a factors climàtics usem l'orografia, la latitud, la continentalitat i la radiació solar o la nuvolositat.

Val la pena destacar que, malgrat que la temperatura mitjana i la precipitació hagin estat força estudiades, les temperatures mitjanes de les mínimes i de les màximes apareixen amb menor freqüència a la literatura. Aquestes variables, a més, tenen un gran interès des del punt de vista bioclimàtic i, per tant, la modelització d'aquestes dues variables pot ser una aportació important al camp de la biogeografia en general.

Tant el procediment com les variables escollides donen lloc a un model simple, robust, útil i força realista en el sentit que no existeixen gaires elucubracions o suposicions poc raonables i que, per tant, el model no perd de vista la realitat física a nivell de grans tendències. És molt fàcil de caure en la temptació d'anar introduint factors i variables

que, si bé poden millorar l'aspecte teòric del model, poden crear artefactes numèrics a causa de la seva difícil o gairebé impossible modelització (si més no amb les eines actuals). Un exemple clar del que estem dient es pot trobar en la radiació reflectida pels objectes veïns. Aquest tipus de radiació té una importància qualitativa petita respecte a la radiació directa però des del punt de vista teòric és més correcte introduir-la. Ara bé, modelitzar aquesta variable és molt difícil perquè intervenen molts factors sobre els quals no es té una informació precisa (albedo dels punts propers, rugositat de les superfícies, etc.). Així doncs, s'ha preferit obviar aquest tipus de radiació abans que modelitzar-la d'una forma poc realista. Tot i així, en futurs treballs s'intentaran afinar aspectes del model en cas que s'obtinguin variables que incrementin el valor predictiu. De tota manera i com es veurà més endavant, els resultats actuals són força bons per sí mateixos sense necessitat de refinar excessivament el model, cosa que sempre pot comportar artefactes numèrics i estadístics.

Aquest model, com ja hem introduït, intenta predir les variables climàtiques d'una manera purament numèrica i objectiva. Per tant, i com a mínim al principi, la intuïció i coneixement de l'estudiós es perden (excepte pel que fa a l'elecció de les variables). És *a posteriori*, però, quan aquests coneixements sobre el territori estudiat poden aportar canvis o millores en els mapes finals. Per aquest motiu hem trobat interessant comparar les metodologies tradicionals amb els mètodes numèrics d'anàlisi espacial.

Per a l'Espanya peninsular, el resultat del present treball consta fonamentalment de 65 mapes climàtics digitals per a cada un dels 11 models desenvolupats (model fraccionat en 10 conques hidrogràfiques i model global per a tot el territori). Així doncs, per a cada model tenim 13 mapes (mensuals i anual) de temperatura mitjana de les mínimes, 13 de temperatura mitjana, 13 de temperatura mitjana de les màximes, 13 de precipitació i 13 de radiació solar potencial, per fer un total de 715 mapes. A més, cada un d'aquests mapes, excepte els de radiació solar, va acompanyat d'un mapa corrector. La importància d'aquests mapes correctors s'explicarà més endavant, a l'apartat 2.2.9.

Pel cas de Catalunya hem desenvolupat 91 mapes repartits com segueix: 13 de temperatura mitjana de les mínimes, 13 de temperatura mitjana, 13 de temperatura mitjana de les màximes, 13 de precipitació, 13 de radiació solar potencial, 13 de

nuvolositat i 13 de radiació solar corregida. A més, cal afegir-hi els mapes correctors pertinents.

També existeixen 39 mapes addicionals de Portugal (13 de temperatura de les mitjanes, 13 de precipitació i 13 de radiació solar) tot i que només els de radiació solar poden ser considerats com a veritablement operatius ja que els altres han estat realitzats a partir de poques dades i només amb la finalitat de completar la Península Ibèrica. Òbviament, un dels objectius a curt termini serà aconseguir les dades climàtiques d'aquest país per poder desenvolupar els nostres models en plenitud de condicions.

1.1.4. Aspectes climàtics generals

García de Pedraza i Reija (1994) defineixen el clima -mot evolucionat a partir de *clino*, paraula d'origen grec que significa inclinat- com un conjunt fluctuant de condicions atmosfèriques influenciat pels tipus de temps dominants (variables) i les característiques del lloc (fixes) agafats durant un període de temps suficientment llarg. És a dir és la síntesi estadística de la interacció entre els aspectes atmosfèrics i els geogràfics durant un cert període de temps. I aquesta és precisament la diferència existent entre meteorologia i climatologia: la primera estudia els fenòmens dinàmics de l'atmosfera que generen el temps mentre que la segona es basa en llargues sèries temporals per tal de poder caracteritzar el comportament de les variables climàtiques d'un indret tot eliminant el factor atzarós que pot donar-se en dies aïllats.

Existeixen tres factors principals que determinen el clima (Jansà, 1969):

- Factors astronòmics.

El clima està sotmès a unes periodicitats de les quals només estan acceptades científicament l'annual (estacions) i la diària (dies) tot i que n'hi ha d'altres, com l'activitat de les taques solars (cada 11 anys) o el cicle de Brückner (cada 35 anys) de les quals encara no hi ha proves concloents per demostrar la seva influència en el clima. Malgrat tot existeix algun treball que proposa l'existència de una relació entre el cicle solar d'11 anys i la precipitació com és el cas de Querreda (1982). Les dues periodicitats admeses,

diària i anual, estan totalment relacionades amb la rotació de la Terra en el primer cas i amb la posició relativa Sol-Terra (distància i inclinació del pla de l'eclíptica) en el segon cas. La inclinació del pla de l'eclíptica, fonamentalment, provoca que la radiació solar que arriba a la Terra sigui molt diferent en funció de l'època de l'any i el lloc considerat. D'aquí es dedueix que la latitud és un factor molt important en la climatologia.

- Factors meteorològics.

Estan constituïts per mecanismes com els fronts, la circulació regional de l'aire i les masses d'aire. Probablement serien força uniformes sinó fos per la variabilitat que introdueixen els factors geogràfics. Contribueixen a fer que un indret rebi la influència de llocs llunyans. Són factors variables en el sentit que no són cíclics com els astronòmics o fixes com els geogràfics.

- Factors geogràfics.

Inclouen fonamentalment l'orografia (altitud, barreres orogràfiques, cubetes, etc.) i la continentalitat. Es tracta en tots els casos de factors permanents.

En aquest punt cal diferenciar entre factors climàtics i elements climàtics, tot i que sovint és força difícil avaluar la incidència de cada un d'ells. Els factors provoquen les diferències climàtiques i els elements són els resultats d'aquests processos. Tot i que aquesta classificació és força clarificadora, sovint la frontera entre elements i factors és confusa ja que un element sovint pot influenciar un altre element exercint el paper reservat als factors. Aquest pot ser el cas del vent quan destapa un cel ennuvolat tot impedit la precipitació en aquell indret. Deixant de banda aquestes qüestions en el present treball, hem utilitzat quatre factors climàtics: dos geogràfics (orografia i continentalitat) i dos astronòmics (latitud i radiació solar) per interpolar quatre elements climàtics: temperatura mitjana de les mínimes, temperatura mitjana, temperatura mitjana de les màximes i precipitació. La variació residual, no explicada pel nostre model, estarà constituïda fonamentalment per factors meteorològics.

El clima estudia les constants dels processos meteorològics tant a nivell determinístic (*i.e.*, els factors físics) com aleatori (*i.e.*, les distribucions de probabilitat de distintes poblacions estadístiques). D'aquest últim punt es pot deduir la necessitat de tenir sèries homogènies (per treure les pertorbacions alienes al procés natural) i normalitzats (per poder comparar les dades en diferents punts del espai), segons Peinado (1985). Per estudiar com estan repartits espacialment i com varien en el temps cronològic els elements climàtics, calen punts d'observació amb continuïtat temporal i espacial, i instruments homogenis de mesura. Aquestes condicions no sempre es compleixen i per tant a vegades pot ser difícil obtenir dades adequades per aquests estudis (García de Pedraza i Reija, 1994).

1.1.5. La climatologia en aquest estudi

Podem ubicar la part climàtica d'aquest treball dins el camp de la climatologia estàtica ja que en cap moment hem estudiat els mapes sinòptics de temps (climatologia dinàmica) sinó que ens hem basat en els estadístics dels principals elements del clima per desenvolupar un seguit de mapes digitals (Capel, 1981).

A més, aquest treball pot tenir interès a nivell de la climatologia física tot i que, com ja hem apuntat abans, no hem aprofundit excessivament en aquest camp. L'estudi de les causes o factors del clima pot ser estudiat a través de la informació obtinguda pels models estadístics de regressió i dels mapes d'anomalies. Els models de regressió ens mostren com varia la relació entre les variables climàtiques i els distintos factors amb l'atractiu que es pot observar l'evolució temporal d'aquestes relacions (tal i com mostrarem al capítol 6). Els mapes d'anomalies, com es veurà, ens donen idea de les zones que poden presentar una climatologia particular en el sentit que no segueix les pautes generals.

Existeixen altres aspectes no tractats en aquest treball però que es podrien realitzar amb relativa facilitat a partir de la cartografia que hem desenvolupat. Ens referim als procediments que tradicionalment s'han desenvolupat per a sintetitzar i caracteritzar la climatologia d'un determinat indret. D'una banda tenim l'aplicació d'índexs

bioclimàtics i d'altra banda tenim el desenvolupament de tècniques de classificació climàtica. Existeixen dos motius que fa interessant abordar aquestes qüestions: el fet de disposar de la informació digital permet aplicar i validar distints models amb relativa facilitat i el fet de disposar de cartografia objectiva i contínua en l'espai ens permet de revisar, comparar i possiblement millorar el que s'ha fet fins ara. Pot ser interessant, per tant, una revisió dels principals índexs. A l'apèndix A calculem, en base als nostres models, l'índex de termicitat (IT) de Rivas-Martínez (1983). A causa que totes les variables que intervenen en l'expressió matemàtica d'aquest índex han estat modelitzades és força senzill d'aplicar-lo per a cada punt del territori i d'aquesta manera obtenir els intervals termoclimàtics per a tota l'Espanya peninsular de forma objectiva i comparar-los amb els definits pel mateix autor al "Mapa de series de vegetación de España".

Altres aproximacions de classificació utilitzant l'anàlisi de components principals (ACP) per a definir àrees climàticament homogènies (Felicísimo i Álvarez, 1982; Benzi *et al.*, 1997; Stone, 1989; etc.) també poden ser implementades amb relativa facilitat a partir dels nostres models digitals.

Volem reproduir, per acabar aquesta introducció, una cita de Font i Quer a Solé Sabarís *et al.* (1952) que expressa una idea que dóna al·licient a estudis com el nostre: "mientras no sea posible conocer con más precisión el clima peninsular, creemos que basta este esquema para comprender en lo fundamental como se distribuyen en el país los principales árboles, arbustos y plantas herbáceas que visten su territorio". L'esquema mencionat en la cita fa referència a la divisió climàtica entre el tipus atlàntic (temperatures suaus i precipitacions elevades), tipus mediterrani (precipitacions estivals baixes) i tipus continental (precipitacions estivals baixes i temperatures mínimes hivernals baixes).

1.1.6. Algunes nocions de SIG

Parlarem, tot seguit, d'alguns conceptes emprats habitualment en SIG i que poden ser importants per als lectors interessats en els continguts climàtics o fitogeogràfics d'aquest treball però no familiaritzats amb tècniques SIG.

Existeixen diverses definicions de SIG, però, hem triat la de Burrough i McDonnell (1998), uns dels tractadistes amb més experiència dins el marc teòric d'aquestes tècniques. Aquest autor defineix els SIG com un conjunt d'eines per a la captació, emmagatzematge, recuperació, transformació i visualització de dades espacials del món real per a unes determinades finalitats. La representació del món real es fa en base a les coordenades geogràfiques, els atributs i la topologia dels elements representats. Per a més informació, es pot consultar altres obres generals, com la de Laurini i Thompson (1992) o l'article de Pons (1996a).

Fonamentalment, existeixen dues maneres de representar la informació digital en un SIG: els sistemes vectorials i els sistemes ràsters o matricials. Aquesta informació, sigui vectorial o ràster, sol estar dividida en capes d'informació. Un sistema vectorial permet representar les entitats espacials mitjançant punts, línies o polígons a base d'emmagatzemar les coordenades dels punts o vèrtexs. Aquests objectes gràfics a la vegada poden portar associada informació diversa. En el nostre cas, usem els vectors de tipus punt per representar les estacions meteorològiques o els punts de mostreig de les dades de vegetació. Hem associat a aquests punts una base de dades amb informació addicional. La utilitat d'aquest format es basa en la possibilitat de realitzar interessants consultes típiques de les bases de dades (quines estacions tenen un precipitació durant el mes de gener més elevada que 500 mm i/o estan a una altitud d'entre 1000-1500 m?) però amb l'afegit interès d'obtenir els resultats amb informació espacial (representació de la seva distribució en l'espai). D'altra banda, la incorporació d'aquesta informació en un SIG ens permet utilitzar-la per interpolar i construir els models climàtics. La resta de capes vectorials usades en el nostre cas han estat purament per facilitar la visualització de la resta d'informació (límits administratius i xarxa UTM bàsicament) o bé per delimitar les àrees mitjançant l'ús de màscares booleanes (màscares lògiques que permeten delimitar les cel·les de les matrius ràster a estudiar).

El sistema matricial o ràster representa la realitat mitjançant cel·les o píxels (unitat mínima d'informació). Aquestes cel·les contenen valors numèrics però, a diferència d'una matriu numèrica en el sentit matemàtic, un ràster està georeferenciat (té coordenades que tenen equivalència dins un determinat sistema de projecció). Si assignem a aquestes matrius georeferenciades una paleta de color acabarem obtenint un mapa que pot ser utilitzat des del punt de vista digital o imprès per passar a format analògic. Pel fet de ser matrius numèriques, aquests ràsters també permeten que es puguin fer operacions matemàtiques i lògiques entre diverses capes d'informació com també interessants consultes com en el cas dels vectors. Per elaborar els mapes climàtics hem utilitzat l'àlgebra de mapes (Tomlin, 1990 i Burrough i McDonnell, 1998) tècnica consistent a portar a terme operacions aritmètiques entre les cel·les de diverses matrius ràster del mateix àmbit geogràfic.

1.1.7. El paper dels SIG a la fitogeografia

Volem, en aquest apartat, simplement assenyalar la progressiva importància dels SIG en les ciències vegetals i en cap cas fer una revisió exhaustiva de la interacció entre aquestes disciplines.

Hi ha tres factors que provoquen que encara existeixi una tradició relativament escassa de l'aplicació d'eines SIG en botànica (tot i que actualment la tendència està canviant):

- els primers SIG implementats en computadores van ser construïts a finals de la dècada 1960-1970, una data relativament recent (Coppock i Rhind, 1991).
- la dispersió de les computadores d'us personal (PC) no es produí fins la dècada dels vuitanta. És en aquest moment quan el SIG podria haver deixat de ser una eina per a l'administració o centres amb grans recursos econòmics i passar a estar a l'abast de tots els usuaris que desitgessin implementar aquestes tècniques per desenvolupar estudis en els seus camps, però no és fins als anys 90 que aquest fet es produeix.

1. Introducció i objectius

Tot i així, és interessant recordar que un dels treballs pioners en cartografia per computadora, l'*Atlas of the British Flora* va ser realitzat per botànics (Perring i Walters, 1962).

En els últims anys, però, la relativa facilitat per accedir a computadores capaces de dur a terme complicats processos i moure importants volums de dades, i el trencament de les inèrcies de tradició inicials, han fet que els SIG s'anessin introduint en totes les disciplines interessades a estudiar fenòmens de variabilitat espacial. Un exemple d'aquest fet el podem trobar en el treball de Pausas i Carreres (1999) que tot i ser un estudi on l'esforç principal s'ha fet al camp (a l'inrevés que en el nostre cas) s'apliquen tècniques bàsiques de SIG per a determinar quantitativament alguns aspectes de la vegetació.

En el camp de la fitogeografia també podem trobar els típics avantatges dels suports digitals en front dels analògics: interès a realitzar consultes potents amb sentit espacial, extracció de nous nivells d'informació, capacitat d'actualització relativament senzilla (important en el cas d'un element canviant com és la vegetació) i possibilitat d'obtenir mapes amb continguts quantitius. Per tots aquests motius creiem que és molt interessant potenciar la incorporació d'eines SIG a l'anàlisi de la vegetació.

Volem destacar en aquest punt la diferència existent entre una cartografia digital i una cartografia basada en un SIG com en el nostre cas. La cartografia digital no basada en SIG segueix tenint els avantatges esmentats pel que fa a la edició de mapes i en algun cas fins i tot es poden realitzar consultes simples. Ara bé, la incorporació d'eines SIG permet realitzar anàlisis numèriques o de consulta molt potents que altrament no es poden fer. Tot i així no s'ha d'entendre un SIG com una tècnica sempre avantatjosa ja que en molts casos una tècnica analògica o purament una representació digital simple poden donar resultats adequats als objectius. Un SIG és realment interessant a nivell d'anàlisi quan es tenen dades per a realitzar operacions que manualment o visualment serien molt difícils de fer.

Per destacar la importància del SIG en la modelització ambiental citarem textualment les paraules de Lieth (1988): "The climate / biosphere interactions require an intensive dialogue between climatologists and geocologists. This dialogue needs the

implementation of large computer-based models and require therefore the participation of information specialists”.

1.1.8. Modelització de la distribució de les espècies vegetals

Al igual que els models climàtics poden ser útils per a diverses disciplines, els models de distribució de la vegetació també poden ser molt interessants tant a nivell aplicat (enginyeria forestal, canvi climàtic i conservació i gestió del territori) com en disciplines més teòriques (botànica, ecologia, etc.). El coneixement dels requeriments ecològics i la potencialitat de cada punt del territori per a una determinada espècie vegetal són elements indispensables per incrementar el coneixement fitogeogràfic i per desenvolupar una gestió adequada del territori (ja sigui dins un marc conservacionista, ja sigui dins un marc d'explotació dels recursos). A més, tal i com exposen Prentice *et al.* (1992) l'elaboració d'aquests models de distribució pot permetre efectuar bones simulacions sota supòsits de canvi climàtic. Això en el nostre cas és viable pel fet de tenir la base climàtica en format digital i, per tant, amb possibilitat de realitzar simulacions amb certa facilitat. La disponibilitat d'eines per a predir uns suposats canvis climàtics podrien tenir molta importància en un futur. A l'apèndix B es pot veure una mostra de l'aplicació dels nostres models de distribució potencial en aquest camp.

Seguint a Allué Andrade (1966) veiem que la fitoclimatologia té per objectiu trobar dades climàtiques i organitzar-les per tal que tinguin sentit per a la vegetació. En fitoclimatologia, tradicionalment s'han desenvolupat índexs climàtics per poder sintetitzar la informació climàtica i d'aquesta manera poder utilitzar-la per a l'estudi de la vegetació. En aquest treball, tot i que cartografiem alguns d'aquests índexs tradicionals partint dels nostres models (vegeu apèndix A), hem desenvolupat una aproximació diferent a la recerca de relacions entre la vegetació i el clima. La finalitat última però, segueix essent la mateixa: poder predir per a un lloc determinat i en base a la seva climatologia quina o quines espècies poden ser-hi presents. Òbviament caldria també incloure altres factors com els edàfics i litològics.

1. Introducció i objectius

A l'igual que per la part climàtica, hem abordat una anàlisi quantitativa de la vegetació amb dos objectius diferents, però interrelacionats. D'una banda tenim els aspectes d'interpolació espacial plasmat en mapes de distribució potencial de la vegetació i, d'altra banda, tenim l'aprofundiment de les relacions vegetació - clima. Treballant amb les matrius ràster generades a partir dels models climàtics i les dades vectorials (tipus punt) de vegetació actual del Segundo Inventario Forestal Nacional (IFN-2) podem obtenir uns mapes digitals de distribució potencial de la vegetació. Fem notar en aquest punt que estrictament no podem parlar de vegetació ja que les dades del IFN-2 són a nivell específic. Per desenvolupar el cartografiat objectiu de la vegetació hem aplicat una tècnica basada en la caracterització numèrica de la distribució de la vegetació actual per a cada una de les espècies arbòries més importants (i algunes arbustives) respecte diferents paràmetres geogràfics i climàtics. És a dir, hem calculat el rang ecològic (valor mínim i màxim en què es troba una espècie) més diversos estadístics descriptius. A partir d'aquests rangs ecològics hem desenvolupat mapes de distribució potencial (tot i que basats en vegetació actual) aplicant eines simples d'àlgebra de mapes. Ara bé, no només és interessant l'aspecte cartogràfic sinó que disposem d'una descripció quantitativa per a les espècies principals de la Península Ibèrica a nivell de la totalitat del territori. Existeixen aportacions numèriques en aquest sentit des de fa alguns anys, com és el cas de la de Pita (1968), però per poques espècies i variables. A Blanco *et al.* (1997) es pot trobar informació dels paràmetres ecològics d'algunes espècies i variables, però en cap cas de forma exhaustiva. L'aportació al camp de la bioclimatologia és, doncs, important en el sentit que es podrà quantificar l'amplitud ecològica de la majoria d'espècies vegetals peninsulars vers un seguit de variables climàtiques i topogràfiques. Obtindrem el que Folch (1981) anomena quadres d'exigències per a moltes de les espècies vegetals més importants de la Península Ibèrica .

A l'apèndix B, com ja hem avançat, pensant en una possible contribució als estudis de canvi climàtic hem analitzat algunes espècies des del punt de vista dels límits de la seva distribució.

Tornant als aspectes de la cartografia de la vegetació, veiem que el procés que hem utilitzat, en essència, és el mateix que s'ha utilitzat clàssicament per desenvolupar els

mapes de vegetació potencial. A partir del coneixement de la vegetació existent (dades del IFN-2) és realitza la interpolació, a llocs on no es té informació, mitjançant el coneixement dels paràmetres geoclimàtics (principalment la topografia i els elements climàtics modelitzats) i de la relació d'aquests amb la vegetació. Així doncs, el model de distribució de la vegetació també pot ser vist, d'alguna manera, com una interpolació espacial ja que obtenim uns mapes continus de probabilitat a partir de la informació puntual i discreta en l'espai de les parcel·les del IFN-2.

La confecció de la cartografia de la vegetació potencial s'ha fet tradicionalment combinant informació climàtica amb informació corològica on les dades climàtiques servien per a inferir la distribució de la vegetació a altres punts del territori. Ara bé, seguint amb els paral·lelismes amb la climatologia, el traçat de les fronteres entre diversos elements també ha estat sovint força subjecte al coneixement del territori per part de l'estudiós tal i com reflecteix la següent cita textual de Martínez (pàgina web visitada el 15-01-2000) "...la interpretación de la vegetación potencial se ha realizado tradicionalmente por métodos intuitivos basados en la experiencia del investigador y en la interpretación de las etapas seriales". Conceptualment el procediment que utilitzem en aquest treball és molt similar al que s'ha fet tradicionalment però intentant eliminar la component intuïtiva i subjectiva al màxim. A més, la informació existent quasi sempre ha estat plasmada analògicament i de forma excloent. En la cartografia sobre suport de paper desenvolupada fins el moment només existeix una única unitat possible (espècie, comunitat, etc.) per a cada tessel·la de l'àrea estudiada. És a dir, en el fons es tracta sempre de mapes de presència / absència tot i que en algunes cartografies hi hagi informació de paràmetres com les abundàncies o el recobriment. En el nostre cas, com es veurà més endavant, la cartografia resultant ens donarà la potencialitat de cada punt del territori vers les distintes espècies estudiades fet molt interessant ja que és evident que potencialment pot existir un solapament entre dues o més espècies vegetals. La més que probable generalització de la implementació de la consulta multicapa de ràsters en els *softwares* de SIG permetrà obtenir per a un determinat píxel o tessel·la (en aquest cas conceptualment el mateix) la probabilitat de totes les espècies estudiades pel punt consultat.

1. Introducció i objectius

La correlació quantitativa entre paràmetres geoclimàtics i la distribució de les espècies vegetals sovint és molt costosa de realitzar usant tècniques clàssiques. Avui en dia però, les computadores i les eines digitals desenvolupades poden facilitar aquests tipus d'estudis. És important destacar que els mapes climàtics obtinguts tenen en compte el factor orogràfic. El fet de no incloure la orografia en les interpolacions climàtiques (o fer-ho de forma molt aproximada) ha estat, tradicionalment, un fort problema a l'hora de correlacionar la informació. També és important el fet de disposar de superfícies contínues que permeten aplicar el model a tot el territori evitant d'aquesta manera la restricció al mostreig puntual o la utilització de dades exclusivament de les estacions meteorològiques més properes.

L'impressionant recull de dades qualitatives realitzada al llarg dels anys per part de grans botànics coneixedors del país com a mínim a nivell de vegetació (Rivas-Martínez, O. de Bolòs, Rivas-Goday, P. Montserrat, Huget del Villar, Quezel, Braun-Blanquet, Castroviejo, Font i Quer, Gaussen, Vigo, Bellot i Peinado Lorca per citar-ne alguns) ha fet que el coneixement de la vegetació sigui abundant. També és cert, però, que existeix una mancança de dades quantitatives per poder realitzar determinades anàlisis de forma més objectiva. Moltes de les espècies més importants estan ben caracteritzades qualitativament però no tant quantitativament. És prou coneguda la continentalitat de *Juniperus thurifera*, la necessitat d'elevades precipitacions de *Fagus sylvatica*, *Quercus robur* o *Quercus pyrenaica*, la resistència al fred de *Pinus uncinata*, etc. Ara bé creiem, que és molt interessant poder disposar de dades quantificables de les amplituds ecològiques de les espècies vegetals per incrementar el coneixement que es té d'aquestes espècies, sovint incomplet.

Al llarg del temps s'han desenvolupat interessants treballs de fitogeografia quantitativa com el d'Ojeda *et al.* (1998) en què es relacionen diverses variables morfològiques dels brucs amb variables climàtiques. Aquest estudi no utilitza tècniques SIG però sí tècniques numèriques d'anàlisi (ACP principalment). L'ús de models climàtics com el nostre poden resultar interessants per servir de base a estudis com aquest. Més interessant pel nostre estudi és el treball de Pigott i Huntley (1981) en què es relacionen els límits dels rangs ecològics d'espècies individuals amb variables macroclimàtiques. Segons Huntley *et al.* (1995) estudis que es poden considerar pioners en la interpolació

de vegetació son els de Hintikka i Iversen. Aquest treballs utilitzen dades les estacions meteorològiques i la presència / absència de les espècies vegetals properes a aquestes estacions per efectuar el que hom anomena “re-mapping of the species distribution into a climate space”. Carey i Ullyett (1993) utilitzen una anàlisi de regressió múltiple per relacionar la distribució actual d’una espècie amb el clima. Segons Huntley *et al.* (1995), P.J. Bartlein ha desenvolupat una metodologia per a ajustar la probabilitat de les superfícies de resposta usant informació de presència / absència de les espècies per acabar obtenint la probabilitat de les espècies en un determinat punt de l’espai climàtic. Conceptualment aquesta metodologia és similar a la utilitzada per nosaltres.

Recentment han proliferat les aproximacions fetes amb tècniques SIG i és d’esperar que en un futur aquestes eines ens permetin incrementar el coneixement de la vegetació que tenim actualment. Treballs com els de Felicísimo (comun. oral 1999) o Narumalani *et al.* (1997) integren mètodes estadístics en SIG per a estudiar la distribució d’una determinada espècie. Ambdós treballs usen la regressió logística com a predictor de la potencialitat de cada una de les cel·les estudiades. Aquest mètode estadístic és conceptualment similar al de la regressió lineal però permet tant la utilització de variables categòriques com de distribucions no paramètriques (no cal que la distribució de les dades sigui normal). Felicísimo (comun. oral 1999) ha desenvolupat mapes de vegetació potencial basats en una anàlisi de regressió logística en algunes àrees dels nord peninsular. Utilitzant variables relacionades amb la topografia, la insolació i la litologia, i aplicant aquesta metodologia estadística obté informació de la probabilitat d’una determinada formació vegetal. Narumalani *et al.* (1997) usen la regressió logística implementada en un SIG en el desenvolupament d’un model per predir la distribució de macròfits aquàtics en funció de diversos paràmetres físics.

Pel fet de treballar amb les matrius ràster obtingudes a partir del model climàtic podem deduir que l’escala de treball és la mateixa. És a dir, tenim els valors de potencialitat de cada espècie estudiada per a cel·les de 4 hectàrees de superfície.

Aquest model és empíric perquè usa dades de camp (obtingudes durant el IFN-2) per construir i validar el model i és estadístic perquè està basat en estadístics descriptius.

1. Introducció i objectius

A nivell de l'Espanya peninsular tenim 3 mapes digitals de distribució potencial de la vegetació per a cada una de les 31 espècies arbòries i 5 espècies arbustives escollides per distints motius. El fet de que existeixin 3 mapes per espècie és a causa de l'aplicació de distintes metodologies, tal i com es veurà a l'apartat 4.2.4. Per a Catalunya tenim una situació similar tot i que per 4 espècies menys. Així doncs existeixen, 108 mapes a nivell estatal i 96 mapes a nivell de Catalunya.

A l'igual que en el cas del model climàtic, els models de distribució de la vegetació realitzats han revertit en mapes digitals i, per tant, en una base numèrica que permet actualitzar-los i realitzar consultes potents que mitjançant un mapa analògic serien molt difícils o impossibles de fer.

1.2. Objectius

Els objectius fonamentals d'aquest treball són:

- Obtenir una cartografia de diverses variables climàtiques (temperatures mitjanes de les mínimes, temperatures mitjanes, temperatures mitjanes de les màximes, precipitació i radiació solar).
- Obtenir una cartografia de la distribució potencial de diverses espècies vegetals.

Aquesta cartografia presenta les següents característiques:

- ◆ Mapes digitals implementats en SIG amb tots els avantatges implícits de consulta, modificació, anàlisi i edició.
- ◆ Mapes objectius amb un nivell d'error conegut, és a dir, basats en models estadístics.
- ◆ Mapes que tenen per àmbit geogràfic la Península Ibèrica, l'Espanya peninsular i Catalunya.

Com a objectius secundaris tenim:

- Aplicació i comparació de distintes metodologies d'interpolació espacial.
- Caracterització numèrica dels rangs ecològics de les espècies vegetals estudiades.
- Desenvolupament de diverses aplicacions dels models desenvolupats.

Volem doncs, assentar les bases per a desenvolupar una anàlisi objectiva de la relació existent entre la vegetació i la climatologia, i la seva representació cartogràfica.

1.3. Síntesi de la metodologia emprada

Tot seguit hem sintetitzat la metodologia utilitzada per a l'elaboració dels models climàtics i fitològics i el seu posterior cartografiat.

- 1) Elecció de les variables dependents o elements climàtics a interpolar (temperatura mitjana de les mínimes, temperatura mitjana de les màximes, temperatura mitjana i precipitació) pel cas dels models climàtics. Elecció de les espècies vegetals a modelitzar.
- 2) Adequació de les dades de les estacions meteorològiques i del IFN-2 als nostres propòsits: canvi de format, filtratge (*i.e.*, per longitud de la sèrie), depuració (*i.e.*, eliminació d'estacions clarament errònies), etc.
- 3) Obtenció o modelització de les variables independents o factors climàtics (altitud, latitud, continentalitat, radiació solar i nuvolositat) que s'usaran en el model de regressió múltiple.
- 4) Anàlisi estadística per relacionar elements climàtics amb els factors climàtics a partir del 60% de les estacions meteorològiques. Elecció del millor model mitjançant tests estadístics.
- 5) Cartografiat d'aquests models de regressió per a tot el territori peninsular mitjançant eines SIG.

1. Introducció i objectius

- 6) Obtenció dels correctors (residus del model de regressió) i utilització d'aquests per corregir els models.
- 7) Validació dels models climàtics generats a partir del 60% de les estacions per comparació amb les dades del 40% restant.
- 8) Repetició dels passos 5, 6 i 7 i obtenció dels mapes finals a partir del 100% de les estacions: 12 mapes mensuals i 1 anual per a cada una de les variables i conques hidrogràfiques més el model global per a tota la Península Ibèrica.
- 9) Elecció de les variables geoclimàtiques i les espècies vegetals a estudiar
- 10) Caracterització quantitativa de les espècies vegetals a partir de les variables escollides i obtingudes a partir dels mapes climàtics per determinar els rangs ecològics de cada espècie vers cada una de les variables geoclimàtiques.
- 11) Elaboració dels mapes de distribució potencial de vegetació mitjançant l'aplicació de l'àlgebra de mapes a partir dels rangs ecològics de les espècies.