

IMPACTES DEL CANVI CLIMÀTIC EN EL SECTOR DE L'ESQUÍ A ANDORRA I POSSIBLES ESTRATÈGIES D'ADAPTACIÓ

PROJECTE DE TESI

Programa de doctorat en Sostenibilitat, Tecnologia i
Humanisme

Marc Pons Pons

Directors:

Martí Rosas Casals

Bàrbara Sureda Carbonell

Èric Jover Comas

Setembre 2011



Resum:

El Canvi Climàtic ha passat de ser una conjectura a una realitat objectiva. L'augment del nivell del mar, l'increment de la temperatura mitjana o de la freqüència dels fenòmens meteorològics extrems són alguns dels efectes observats durant el segle passat que han convertit el canvi climàtic en una evidència més que contrastada.

En aquest context de canvi climàtic, les regions de muntanya han estat identificades com a zones especialment vulnerables. El ràpid retrocés de les glaceres i les congestes, la disminució de les precipitacions en forma de neu, l'augment de riscos naturals com poden ser les esllavissades o l'alteració en la quantitat i en la distribució de la biodiversitat, demostren l'alta sensibilitat que caracteritza a aquests ecosistemes. A més a més, en l'economia de moltes regions de muntanya, la neu juga un paper clau ja que és el recurs sobre el qual es basa la seva principal font d'ingressos i el seu motor de desenvolupament local, el turisme d'hivern. Per aquest motiu, l'avaluació dels efectes del canvi climàtic en la quantitat i la variabilitat temporal de la innivació és especialment necessària per tal de poder valorar els possibles impactes socioeconòmics en aquest tipus de regions.

D'altra banda, en els darrers anys i gràcies en gran mesura a les ajudes i subvencions públiques, les estacions d'esquí estan realitzant una forta inversió en instal·lacions d'innivació artificial. Amb aquesta mesura d'adaptació, es pretén atenuar els efectes de la variabilitat climàtica i garantir una suficient cobertura de neu que permeti operar durant tota la temporada i garantir el nivell d'ingressos. No obstant, no totes les estacions podran compensar o reduir la seva vulnerabilitat amb la innivació artificial, algunes degut a condicionants de rendibilitat econòmica i d'altres a causa del fort impacte ecològic que suposaria sobre el territori una subsistència del sector basada, massivament, en aquesta mesura d'adaptació.

Si ens centrem en Andorra i els Pirineus, hi ha una clara manca d'estudis en aquesta direcció. Per aquest motiu, es coneix encara amb molt poca profunditat com la variabilitat climàtica acabarà afectant al sector i si les estratègies d'adaptació que s'estan duent a terme són les més adients. Quin és el grau de canvi climàtic que es pot tolerar fins que la indústria de l'esquí deixi de ser viable inclús amb mesures d'adaptació? Respondre a aquesta pregunta serà essencial per tal de poder realitzar una adequada planificació futura, no només a Andorra sinó en la majoria de regions de muntanya. No obstant, la forta dependència del turisme d'hivern que caracteritza l'economia andorrana fa que la resposta a la pregunta formulada prengui encara més valor i sigui, no tan sols important per valorar la sostenibilitat del sector, sinó que molt probablement també ho sigui per valorar la sostenibilitat de l'actual model de desenvolupament de tot el país.

Els principals objectius d'aquesta tesi són, d'una banda avaluar com es veuria afectat el sector de l'esquí a Andorra si es complissin les projeccions de Canvi Climàtic i d'altra analitzar quines són les tècniques i estratègies més adients per fer front als futurs canvis tenint en compte tant els costos econòmics com ambientals de les possibles mesures d'adaptació.

Abstract:

Climate Change has become no longer a conjecture but an objective reality. The sea level rise, the increase of the global average temperature or the extreme weather events are some examples noticed during the past century that have turned the global warming into a sharply contrasted evidence.

In this context of climate change, mountain regions have been defined as especially vulnerable areas. The rapid retreat of glaciers and permafrost surfaces, the decrease of snow precipitations, the increase of natural risks such as landslides or the alteration in the amount and distribution of some species prove the remarkable sensitivity of mountain ecosystems. Moreover, in many mountain economies, reliable snow cover plays a key role as an important resource for the winter tourism industry, the main income source and driving force of local development in such regions. For this reason, research on the effects of Climate Change on the snow cover amount and temporal variability is particularly necessary in order to assess the potential socioeconomic impacts in a mountain region.

On the other hand, in recent years and thanks mainly to public subsidies and interventions, ski resorts are investing huge amounts of money in snowmaking infrastructures. By means of this policy, it is expected to offset the effect of climate variability and guarantee the snow cover necessary to assure the income level throughout the whole season. However, all ski resorts will not be able to offset or attenuate their vulnerability by means of snowmaking, either due to economic constraints or due to the severe environmental impacts related to this adaptation strategy.

If we focus on Andorra and the Pyrenees, there is a research gap due to a clearly lack of studies in this field. For this reason, it is not accurately known how Climate Change will affect the ski industry and if adaptation strategies that are being carried out are suitable for this specific region. What range of the Climate Change is bearable until ski industry ceases to be viable even with adaptation strategies? The answer to this question will be an essential factor in order to carry out a suitable future planning, not only in Andorra but also in most mountain areas. Nevertheless, Andorran economy performs a strong reliance on winter tourism, so to answer this question reaches a higher importance, not only to assess the sustainability of the ski industry but probably to assess the sustainability of the current development model of the whole country.

The main goal of this study is to assess how climate change projections could affect the ski industry and secondly, which are the most appropriate adaptation techniques and strategies to offset the climate variability impacts taking into account both the economic and environmental costs.

Índex

1. Introducció.....	1
2. Estat de l'art.....	2
2.1 El canvi climàtic en regions de muntanya.....	2
2.2 El canvi climàtic a Andorra i els Pirineus.....	6
2.3 El canvi climàtic i el turisme d'hivern.....	9
3. Justificació i aportació de la tesi	15
2. Objectius de la tesi.....	16
2.1 Objectius generals	16
2.2 Objectius específics	17
4. Metodologia	19
4.1 Anàlisi de fons documentals i tractament estadístic de les dades	19
4.2 Tractament cartogràfic de l'àrea d'estudi	19
4.3 Modelització de la interacció entre la dimensió ambiental i social	20
4.3 Modelització dels impactes indirectes.....	21
5. Planificació, desenvolupament de la tesi i resultats obtinguts.....	22
5.1 1r Semestre - Setembre 2010 a Febrer de 2011	22
5.2 2n Semestre - Març a Agost de 2011	25
5.3 3r Semestre - Setembre 2011 a Febrer 2012	29
5.4 4t Semestre - Març a Agost 2012.....	29
5.5 5é Semestre Setembre 2012 a Febrer 2013	29
5.6 6é Semestre Març 2013 a Agost 2013	29
6. Bibliografia	30

Annex I. Diagrama de Gantt de la planificació de la tesi

Annex II. Pons-Pons, M., *et al.*; "A georeferenced agent-based model to analyze the climate change impacts on the Andorra winter tourism"; arXiv version (Submitted to *Environmental Modelling and Software*)

1. Introducció

El canvi climàtic ha passat de ser una conjectura a una realitat objectiva. L'augment del nivell del mar, l'increment de la temperatura mitjana, de la freqüència dels fenòmens meteorològics extrems o de la desertificació són alguns dels efectes observats durant el segle passat que han convertit l'escalfament global en una evidència més que contrastada (IPCC, 2007).

En aquest context de canvi climàtic, les regions de muntanya han estat identificades com a regions especialment vulnerables (IPCC, 2001; 2007; Beniston, 2003). El ràpid retrocés de les glaceres i les congestes, la disminució de les precipitacions en forma de neu, l'augment de riscos naturals com poden ser les esllavissades o l'alteració en la quantitat i en la distribució de la biodiversitat demostren l'alta sensibilitat que caracteritza a aquests ecosistemes (Beniston 2003). A més a més, en l'economia de moltes regions de muntanya, la neu juga un paper clau ja que és el recurs sobre el qual es basa la seva principal font d'ingressos i el seu motor de desenvolupament local, el turisme d'hivern (Beniston, 2002; Bürki et al., 2003; WTO, 2003). El turisme d'hivern és aquell turisme destinat a la realització d'activitats relacionades amb la muntanya i la natura i especialment totes aquelles activitats lligades a la pràctica d'esports com l'esquí alpí, l'esquí de fons o el surf de neu.

Tot i que el canvi climàtic és només un dels molts factors que influeixen en el turisme d'hivern, la presència o absència de neu, en concret, el gruix disponible i la seva temporalitat són elements claus a l'hora d'avaluar la viabilitat i la sostenibilitat d'aquest sector a mig i llarg termini (König i Abegg, 1997). Per aquest motiu, l'avaluació dels efectes del canvi climàtic en la quantitat i la variabilitat temporal de la cobertura de neu és especialment necessària per tal de poder valorar els possibles impactes socioeconòmics en una regió. En aquesta línia, el turisme d'hivern ha estat identificat per diverses organitzacions governamentals i intergovernamentals com a un sector especialment vulnerable als efectes del canvi climàtic (Canada Country Study, 1998; ACACIA, 2000; US National Assessment Team, 2000; WTO, 2003; IPCC, 2007; CADS, 2008, 2010). En els darrers anys diferents estudis han analitzat la vulnerabilitat del sector de l'esquí en diferents regions del món com els Alps (König i Abegg, 1997; Breiling i Charamza, 1999; Elsassner i Bürki, 2002; Abegg et al., 2007; Steiger, 2008, 2010; Uhlman et al., 2009), Canadà (McBoyle and Wall, 1987; Lamothe i Périard, 1988; Scott et al., 2003, 2006, 2007), Estats Units (Lipski i McBoyle, 1991; Hayhoe et al., 2004; Casola et al., 2005; Dawson i Scott, 2007; Scott et al., 2008; Dawson et al., 2009), Suècia (Moen i Fredman, 2007), Austràlia (Galloway, 1988; Henessy et al., 2003; Bicknell i Magnus, 2006), Japó (Fukushima et al., 2002) i Corea del Sud (Heo and Lee, 2010). Tos aquests estudis indiquen en major o menor mesura que el canvi climàtic portarà a una reducció de la durada de la temporada d'esquí, una reducció de la superfície esquiable i una disminució de la freqüentació d'esquiadors tant en estacions situades a cotes baixes com en aquelles ubicades a baixes latituds.

Tot i que tots els estudis científics publicats fins a la data apunten en la mateixa direcció i projecten conseqüències negatives per al sector: una disminució dels ingressos i un

augment dels costos d'adaptació; encara es fa difícil poder predir amb exactitud quan es produiran i amb quina magnitud.

D'altra banda, en els darrers anys i gràcies en gran mesura a les ajudes i subvencions públiques, les estacions d'esquí estan realitzant fortes inversions en instal·lacions d'innivació artificial (Steiger, 2008; Clarimont, 2008). Amb aquesta mesura d'adaptació, es pretén atenuar els efectes de la variabilitat climàtica i mantenir una suficient cobertura de neu que permeti operar durant tota la temporada i garantir el nivell d'ingressos. No obstant, no totes les estacions podran compensar o reduir la seva vulnerabilitat amb la innivació artificial. Algunes degut a condicionants de rendibilitat econòmica i d'altres a causa del fort impacte ecològic que suposaria sobre el territori una subsistència del sector basada, massivament, en aquesta mesura d'adaptació (Steiger, 2008).

Si ens centrem en Andorra i els Pirineus, trobem una clara manca d'estudis en aquesta direcció. Per aquest motiu, es coneix encara amb molt poca profunditat com la variabilitat climàtica acabarà afectant al sector i si les estratègies d'adaptació que s'estan duent a terme són les més adients. Quin és el grau de canvi climàtic que es pot tolerar fins que la indústria de l'esquí deixi de ser viable inclús amb mesures d'adaptació? Respondre a aquesta pregunta serà essencial per tal de poder realitzar una adequada planificació futura, no només a Andorra sinó en la majoria de regions de muntanya. No obstant, la forta dependència del turisme d'hivern que caracteritza l'economia andorrana fa que la resposta a la pregunta formulada prengui encara més valor i sigui, no tan sols important per valorar la sostenibilitat del sector, sinó que molt probablement també ho sigui per valorar la sostenibilitat de l'actual model de desenvolupament de tot el país.

2. Estat de l'art

2.1 El canvi climàtic en regions de muntanya

Les muntanyes representen zones úniques per a la detecció del canvi climàtic i l'avaluació dels seus impactes. Per una banda, els alts gradients altitudinals que fan que el clima variï ràpid amb l'alçada amb curtes distàncies, fa que la vegetació i l'hidrologia també variïn amb aquests gradients (Whiteman, 2000). Per aquest motiu, les muntanyes exhibeixen una gran biodiversitat, sovint amb transicions abruptes en el tipus de vegetació (ecotons) i en el pas de vegetació i terra a neu i gel. A més a més, els ecosistemes de muntanya sovint són endèmics ja que moltes espècies romanen aïllades a cotes altes en comparació amb les comunitats vegetals de les zones menys elevades, les quals poden ocupar nínxols climàtics més amplis. La biodiversitat de les zones de muntanya comprèn tant les espècies naturals com les cultivades. Aquests sistemes són altament sensibles al canvi climàtic i és probable que tinguin diferents llindars de vulnerabilitat en funció del tipus d'espècie, la seva amplitud i el grau d'intensitat del canvi climàtic. Ja que el gradient de temperatura amb l'augment d'alçada és d'entre -5 i -10°C per cada km, s'espera que es produeixin pèrdues en les reserves naturals de

les zones climàtiques més fredes situades als pics i un desplaçament cap a cotes més elevades de la resta de cinturons de vegetació. A més a més, com les cotes més elevades són menys extenses, es produirà una reducció de la població i un augment de la seva vulnerabilitat genètica enfront les pressions ambientals (Peters i Darling, 1985; Hansen-Bristow et al., 1988; Beniston, 2003). Cumming i Burton (1996) han demostrat que alguns dels ecosistemes que es desplacin cap a cotes més altes poden acabar desapareixent dels seus habitats potencials a causa d'una major sensibilitat a sequeres i glaçades i també a la manca d'hiverns freds, element vital per la regeneració i la robustesa dels arbres. Huntley (1991) parla de tres tipus de respostes al canvi climàtic dels ecosistemes en les regions de muntanya: adaptacions genètiques, invasions biològiques a través de la competència entre espècies i l'extinció d'espècies. El camí de l'adaptació suposarà un progressiu reemplaçament de les espècies actualment dominants per espècies termòfiles. Alguns estudis han demostrat que als Alps algunes plantes han respost d'aquesta manera a l'escalfament observat durant el segle XX (Grabherr et al., 1994; Keller et al., 1999). S'espera que la resposta dels ecosistemes sigui més important en els límits dels ecosistemes, si aquests tenen un distribució gradual ("ecocline") o en els ecotons si els canvis en el tipus de vegetació es produeixen de forma escalada.

Pel que fa al cicle hidrològic, un augment de les temperatures podria afectar tant al seu regim com en la seva estacionalitat. Les corrents de distribució, l'estacionalitat i la quantitat de precipitacions poden experimentar canvis significatius en diverses regions de muntanya. El canvi climàtic suposarà un increment en les taxes d'evaporació i una major proporció de precipitacions en forma de pluja. Les variacions en la quantitat i l'estacionalitat de les precipitacions afectaran aspectes com la humitat del sòl, les reserves dels aqüífers o la freqüència d'inundacions i sequeres. Les conseqüències en la variació de l'escorrentia del riu afectaran no només a les conques hidrogràfiques d'alta muntanya, sinó també les de les zones menys elevades ja que aquestes depenen significativament dels recursos de muntanya. En moltes regions de muntanya, la neu i el gel són un component clau en el cicle hidrològic i la quantitat i l'estacionalitat de l'escorrentia està estretament lligada als processos criosfèrics. Ja que les regions de muntanya són la font del 50% dels rius del planeta, és provable que el canvi climàtic tingui greus repercussions no només en les pròpies regions de muntanya sinó també en regions menys elevades, altament poblades, en les que el subministrament d'aigua per usos domèstics, agrícoles, per la generació d'energia i per usos industrials depèn fortament dels recursos hidrològics de muntanya. Per tant, les variacions climàtiques tindran un efecte sobre els sistemes econòmics reduint-ne el subministrament i la qualitat de l'aigua (Beniston 2003).

D'altra banda, les glaceres són un valuós indicador del canvi climàtic. Degut a la seva gran sensibilitat, representen una clara evidència de l'escalfament global i del canvi en el règim de precipitacions (Haeberli i Beniston, 1998). El volum de gel en les glaceres ve determinat per el balanç entre l'acumulació de neu i gel (entrades) i el desgel i la separació de blocs de gel (sortides). Aquests factors venen determinats per la temperatura, la humitat, la velocitat del vent i d'altres factors com la pendent i l'albedo del gel (Fitzbarris et al, 1996). A mesura que augmenta la temperatura mitjana, aquest balanç es veurà alterat. Per exemple, en el cas dels Alps, la superfície de les glaceres s'ha reduït entre un 30 i un 40% des de 1850 (Haeberli i Beniston, 1998). Altres regions com els Alps de Nova Zelanda (Chinn, 1996) o regions d'Àsia central també han experimentat una recessió en el volum de les glaceres.

Segons els models de balanç energètic, si es compleixen els escenaris que pronostiquen un increment d'entre 2 i 4°C, al 2100 podria desaparèixer entre un 30 i un 50% de la massa actual de les glaceres (Beniston, 2003). La figura 2.1 ens mostra la variació al 2003 de la superfície d'una glacera als Alps austríacs respecte l'any 1905.



Figura 2.1: Superfície de glacera Hornkees al Tirol austríac. (a)1905 i (b) 2003. Font: Gesellschaft für Ökologische Forschung.

També s'han observat canvis en l'estacionalitat de les acumulacions de neu (Cayan, 1996; Cayan i Dettinger, 1995). En les regions de muntanya temperades, la neu acumulada acostuma a trobar-se propera al punt de desgel, fet que es tradueix en una ràpida resposta davant petits canvis de temperatura. A mesura que l'escalfament global augmenti, regions on les precipitacions acostumen a ser en forma de neu experimentaran un increment de les precipitacions en forma de pluja. S'estima que per cada grau centígrad d'increment de temperatura, la cota en la que es situa la línia de neu pujarà uns 150 m (König i Abegg, 1997). La variació en l'acumulació de neu com a conseqüència del canvi climàtic serà un factor crucial en la futura disponibilitat d'aigua en les diferents conques hidrogràfiques. Alguns estudis de sensibilitat indiquen que per sota dels 1500 m, la quantitat i la duració de la cobertura de neu es veurà greument disminuïda (Martin i Duran, 1998).

D'altra banda, la cobertura de neu proveeix a les plantes una capa de protecció durant l'hivern i el subministrament de l'aigua necessària durant l'estiu. Les plantes de muntanya es caracteritzen per un període de creixement molt curt en el que requereixen aigua i que acostuma a coincidir amb el període sense neu. Ozenda i Borel (2001) han demostrat que la vegetació que viu en els llits i les depressions de zones nevades són les més vulnerables al canvi climàtic ja que són les que estaran més subjectes a la dessecació durant l'estiu. En regions en les que es produeixi un augment de temperatura i de sequedat, especialment aquelles que es veuen influenciades per règims continentals i mediterranis, la vegetació de muntanya es pot veure afectada per un augment de l'evapotranspiració, i per tant, d'un increment de l'estrès hídric.

D'altra banda, el foc és un element de particular importància en molts ecosistemes ja que juga un doble paper en la regeneració vegetal i com a element destructiu dels

ecosistemes. És molt probable que amb el canvi climàtic es vegin fortament modificades tant la freqüència com la intensitat dels incendis. Tal i com projecta l'informe del IPCC del 2007, està previst que augmentin considerablement els períodes perllongats de sequeres durant els estius convertint regions ja altament sensibles en regions amb un risc molt elevat d'incendi. Zones com la serralada de la costa californiana, les muntanyes Blaves de Nova Gales a Austràlia o les serralades prelitorals del Mediterrani es veuran severament afectades. A més a més, moltes d'aquestes regions comprenen àrees densament poblades com la badia de San Francisco, Sidney o les costes mediterrànies, fet que les converteix en molt vulnerables a un augment del risc d'incendi a causa del canvi climàtic. D'altra banda, algunes regions que fins ara no s'han considerat en risc es poden començar a veure afectades a causa de la variació dels límits climàtics, ambientals i biològics que condicionen la generació d'incendis (Johnson, 1992).

Finalment trobem que en les zones de muntanya existeix una forta relació i dependència entre els sistemes físics i socials ja que aquestes regions segueixen basant en gran mesura la seva economia en els recursos naturals disponibles. Per exemple, en els últims decennis el turisme de neu i muntanya s'ha convertit en una activitat econòmica molt productiva, passant a ser la principal font d'ingressos i de desenvolupament de moltes regions de muntanya. A més a més, en els darrers anys s'ha detectat que el ritme amb el qual s'estan produint els canvis és més elevat en les regions de muntanya que a escala global (Beniston 2003).

Per aquests motius, les regions de muntanya són altament susceptibles als impactes del canvi climàtic i es presenten com a interessants emplaçaments per la detecció i l'avaluació dels impactes sobre els sistemes ecològics i socioeconòmics (Beniston 2003). La figura 2.2 sintetitza els impactes que es poden produir en les regions de muntanya i el fort vincle que existeix entre els possibles canvis en la dimensió ambiental i social.



Figura 2.2: Síntesi dels impactes del canvi climàtic en regions de muntanya. Font: Beniston, M., (2003). Climatic change in mountain regions: a review of possible impacts. Climatic Change, 59, 5-31.

2.2 El canvi climàtic a Andorra i els Pirineus

A diferència d'altres regions com els Alps o Nord-Amèrica, encara es disposa de molt poca bibliografia relativa al canvi climàtic als Pirineus. Tot i això, es poden trobar algunes publicacions que analitzen l'evolució de la temperatura, les precipitacions i la cobertura nevosa durant el segle XX i algunes que realitzen projeccions per al segle XXI. L'any 2008 Lavaud va recopilar per l'Agence Régionale pour l'Environnement totes les dades relatives als impactes del canvi climàtic a la regió francesa de Midi-Pyrénées. En aquest estudi es demostra que el canvi climàtic està sent més significatiu en aquesta regió que a escala global. La temperatura mitjana dels Pirineus s'ha incrementat $1,3^{\circ}\text{C}$ entre 1945 i 2007, mentre que a escala nacional i global l'increment ha estat de $0,9^{\circ}\text{C}$ i $0,74^{\circ}\text{C}$ respectivament (Figura 2.3).

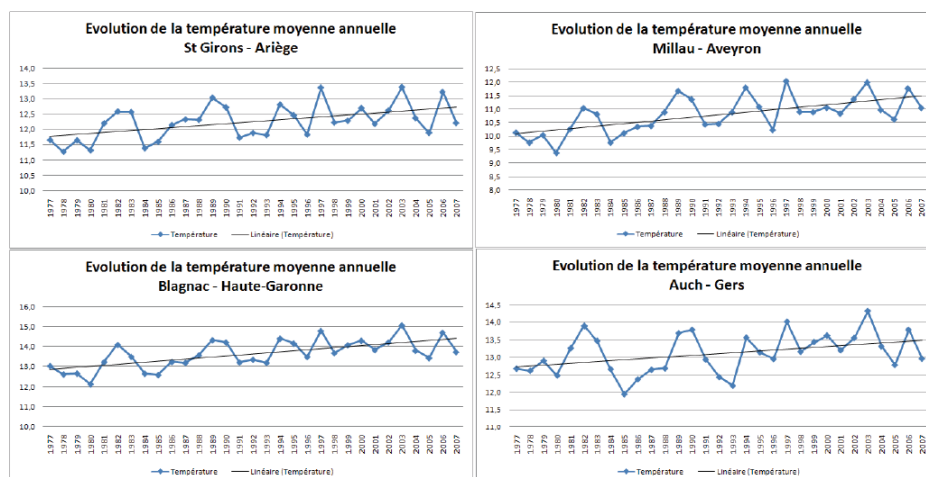


Figura 2.3: Evolució de la temperatura mitjana a diferents punts del Pirineu francès (1977-2007). Font: Lavaud, 2008, Météo-France/ARPE 2008.

D'altra banda, segons dades de Météo France, des de 1951 el nombre de dies en que s'han registrat temperatures inferiors a 0°C (dies de gel), ha disminuït una mitjana de 5 dies en un total de 23 estacions del Pirineu francès (figura 2.4).

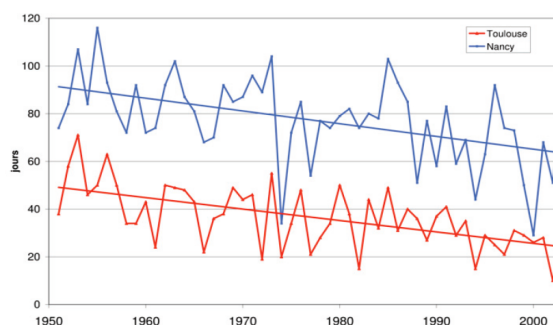


Figura 2.4: Evolució dels dies de gel des de 1951. Font: Météo France.

Segons dades de Météo France i el CNRS (Centre National de Recherche Scientifique) (Planton, 2008), des de 1951 s'ha constatat un augment dels dies en els que s'han superat els 25°C i en termes generals s'ha registrat un augment de la durada de les sequeres. Segons la mateixa font, les tendències observades en les precipitacions des de 1901 no són tan clares i mostren una alta variabilitat territorial. No obstant, en la mitjana de tot el Pirineu francès s'ha detectat un augment. Pel que fa a les projeccions de canvi climàtic, Météo France i el CNRM (Centre National de Recherches Météorologiques) han desenvolupat models de simulació a escala nacional en els que es pronostica un augment en la temperatura mitjana tant a l'hivern com a l'estiu en tots el Pirineus (figura 2.5). Pel que fa al règim de precipitacions durant l'hivern, augmentarà en algunes regions i disminuirà en d'altres. En canvi, durant l'estiu gairebé la totalitat del Pirineu en patirà una reducció (figura 2.6).

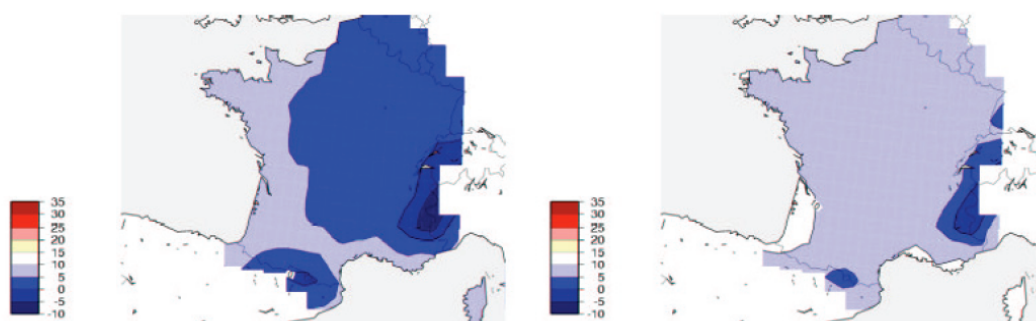


Figura 2.5: Variació de la temperatura mitjana a l'hivern (%). Actual (esquerra) i projectada amb l'escenari A2 del SRES (dreta). Font: Météo France/CNRM. Planton, 2008.

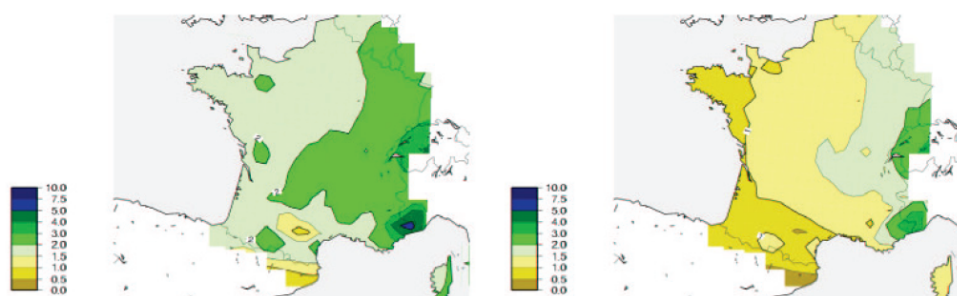


Figura 2.6: Variació de les precipitacions mitjanes durant l'estiu (%). Actual (esquerra) i projectada amb l'escenari A2 del SRES (dreta). Font: Météo France/CNRM. Planton, 2008.

Pel que fa a les projeccions de cobertura de neu, Etchevers i Martin (2002) van fer el primer anàlisi de la variabilitat al Pirineu francès. En el seu estudi, pronostiquen una alta sensibilitat a l'augment de les temperatures, especialment a cotes mitges i baixes, en les que per un augment de 2°C s'espera una reducció d'entre un 25 i un 50%. En canvi, a cotes altes les reduccions no seran tan significatives, assolint valors entorn al 20%. En el seu estudi, també assenyalen que a 1500 m es produirà una reducció de la durada mitjana de la cobertura de neu (Figura 2.7).



Figura 2.7 Durada mitjana de la cobertura de neu als Pirineus a 1500 m d'alçada (en dies per any), simulada amb SAFRAN i CROCUS. (esquerra) Situació actual, (dreta). Escenari de canvi climàtic.

D'altra banda, un dels autors que més ha treballat la variació climàtica als Pirineus en els darrers anys ha estat López Moreno (2008, 2009). En les seves publicacions analitza mitjançant models de canvi climàtic regional (RCM) l'evolució de les temperatures, les precipitacions i la cobertura nevosa durant el segle XX i realitza projeccions pel segle XXI. En una de les publicacions més recents (López-Moreno, Goyette i Beniston, 2009) es pronostica que la cobertura de neu del Pirineu es veurà greument afectada pel canvi climàtic, tant pel que fa al gruix com en la seva temporalitat. A més a més, detecta una gran variabilitat espacial, essent les regions centrals del Pirineu les més afectades. L'estudi també demostra com l'impacte del canvi climàtic és molt sensible al gradient altitudinal. Per exemple, l'impacte projectat per una cota de 3000 m suposa només un 25% de l'impacte simulat per als 1500 m. Per al 2100, el model projecta sota l'escenari A2 de l'IPCC, una reducció de ASWE¹ de fins a un 78% a 1500 m, un 44% a 3000 m i una reducció de la durada de la cobertura del 70% i del 32% respectivament (figura 2.8).

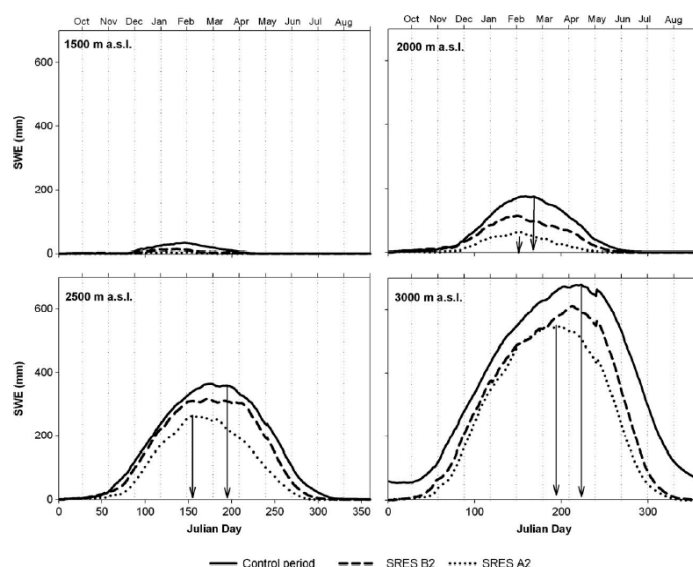


Figura 2.8: Projeccions de la variació de la cobertura de neu (mm de neu equivalent en aigua SWE) a diferents cotes. Font: López-Moreno, Goyette i Beniston, 2009.

¹ Aigua equivalent en forma de neu acumulada. És la quantitat d'aigua que conté la cobertura de neu acumulada durant un any. La seva equivalència en cm de neu dependrà de la densitat de la neu, normalment entre el 5 i el 20%.

Pel que fa al canvi climàtic a Andorra, fins a dia d'avui, només Esteban et al. (2010) han tractat el tema. En el seu treball, analitzen l'evolució de les temperatures i les precipitacions des de 1934 fins a l'any 2008. L'estudi demostra que en aquest període les tendències de la temperatura màxima i la temperatura mínima són d'increment, d'acord amb els resultats obtinguts seguint dos mètodes independents d'anàlisi de l'homogeneïtat de sèries: SNHT i Caussinus-Mestre.

Els increments registrats en la temperatura mitjana anual són d'entre 0,10 i 0,12°C per dècada, d'entre 0,11 i 0,18°C per dècada en la temperatura màxima estival i d'entre 0,17 i 0,25°C per dècada en la temperatura mínima hivernal. El càlcul de les tendències acumulades per a tot el període indica que la temperatura mitjana anual d'Andorra ha augmentat entre 0,63 i 0,71°C durant el període 1934-2008, uns valors que permeten afirmar que hi ha hagut un escalfament del clima a Andorra al llarg dels darrers 74 anys (figura 2.9).

D'altra banda, tot i que l'estudi no es demostra estadísticament significatiu s'apunta cap a una disminució de les precipitacions.

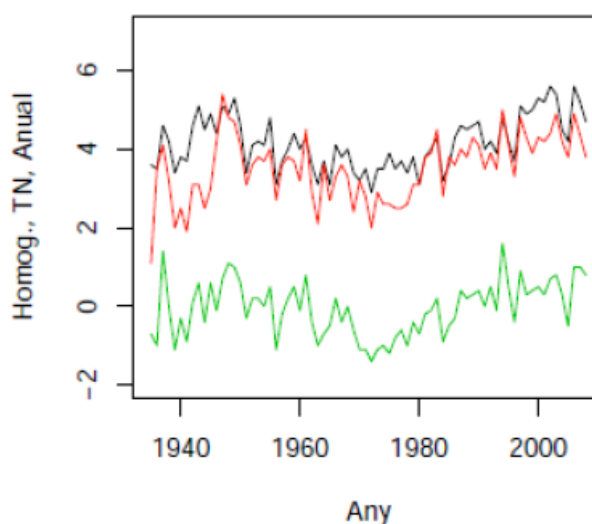


Figura 2.9: Evolució de la temperatura mitjana anual des de 1938 al 2008 per a tres estacions meteorològiques del país. Font: Esteban et al. 2010.

2.3 El canvi climàtic i el turisme d'hivern

En els darrers 25 anys, el turisme ha estat un dels sectors econòmics que ha conegut un major creixement en tot el món. En moltes regions de muntanya, el turisme és un motor clau en el desenvolupament econòmic i molt probablement el canvi climàtic tingui uns impactes tant directes com indirectes sobre aquest sector (WTO, 2003). Els impactes directes són aquells que provoquen canvis en les condicions climàtiques necessàries per dur a terme activitats específiques, com per exemple l'esquí. Com a impactes indirectes es consideren per

una banda, les modificacions en el paisatge i per una altra banda, els canvis socioeconòmics, per exemple els patrons de demanda per una activitat o destinació específica (Price, 1990).

Es preveu que el canvi climàtic alterarà els patrons d'estacionalitat, principalment de la temporada d'esquí i les pressions mediambientals associades a les diferents formes de turisme. En aquesta línia, s'han dut a terme nombrosos estudis per tal d'avaluar els possibles impactes del canvi climàtic en el turisme d'hivern de les regions de muntanya. La successió d'hiverns cada cop menys freds provocarà la disminució de la cobertura nevosa a aquestes cotes i per tant, la probabilitat de disposar d'una cobertura de neu fiable durant els pics de vacances (Nadal, febrer i Pasqua).

Fins a dia d'avui s'han dut a terme nombrosos estudis per tal d'avaluar els possibles impactes del canvi climàtic en el turisme d'hivern de diverses regions de muntanya. El sector de l'esquí ha estat analitzat en regions com els Alps (König i Abegg, 1997; Breiling i Charamza, 1999; Elsassner i Bürki, 2002; Abegg et al., 2007; Steiger, 2008, 2010; Uhlman et al., 2009), Canadà (McBoyle and Wall, 1987; Lamothe i Périard, 1988; Scott et al., 2003, 2006, 2007), Estats Units (Lipski i McBoyle, 1991; Hayhoe et al., 2004; Casola et al., 2005; Dawson i Scott, 2007; Scott et al., 2008; Dawson et al., 2009), Suècia (Moen i Fredman, 2007), Austràlia (Galloway, 1988; Henessy et al., 2003; Bicknell i Magnus, 2006), Japó (Fukushima et al., 2002) i Corea del Sud (Heo and Lee, 2010).

En un dels primers estudis a Europa, Abegg i Froesch (1994) van demostrar que si es produís un increment d'entre 2 i 3°C a l'any 2050, les estacions d'esquí suïsses localitzades per sota dels 1200-1500 m es veurien greument afectades. La successió d'hiverns cada cop menys freds provocaria la disminució de la cobertura nevosa a aquestes cotes i per tant, la probabilitat de disposar d'una capa de neu fiable durant els pics de vacances (Nadal, febrer i pasqua).

Una norma generalment acceptada per a avaluar la viabilitat de la temporada d'una estació d'esquí és disposar d'una cobertura de 30 cm de neu com a mínim durant 100 dies (fiabilitat de la neu) (Witmer, 1986). Es coneix com a línia de fiabilitat de la neu (SRL) aquella cota a partir de la qual es compleix aquesta condició. Basant-se en aquests criteris, König i Abegg (1997) van demostrar que durant el segle XX un 85% de les estacions d'esquí de Suïssa van disposar d'una quantitat fiable de neu, mentre que un increment de 2°C disminuiria aquest percentatge en un 63%. Cal destacar que en tots aquests estudis no es tenen en consideració mesures d'adaptació.

Més recentment, l'Aspen Global Change Institute va publicar un estudi sobre el canvi climàtic a Aspen (2006) en el qual s'afirmava que en el pitjor dels escenaris de l'IPCC es podria donar el cas que al 2100 cap de les actuals estacions d'esquí disposi d'una adequada qualitat de la neu per a que l'activitat pugui ser viable. L'any següent, l'OCDE va publicar el que fins a dia d'avui es considera l'estudi de referència "*Climate Change in the European Alps*" (Abegg et al., 2007) on s'avalua la vulnerabilitat del sector de l'esquí per a les diferents estacions dels Alps europeus i en la que també s'analitzen les possibles mesures d'adaptació que s'estan prenent i les que es podrien prendre un futur. L'estudi preveu que per un augment d'1°C de la temperatura mitjana, les pistes d'esquí viables amb neu natural es reduiran al 75% de les

actuals, al 60% per un augment de 2°C i tan sols un 30% de les estacions actuals seran viables sota un increment de 4°C (figura 2.10).

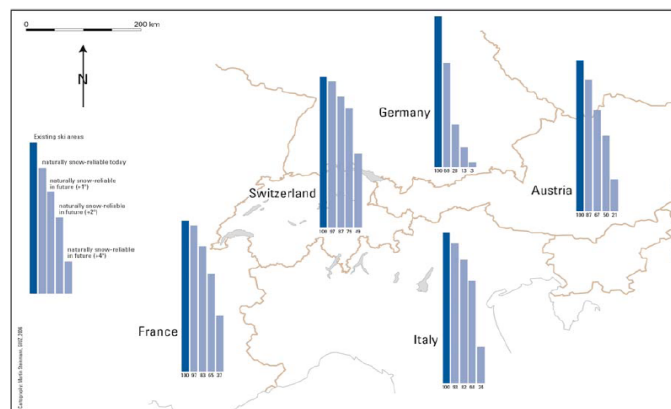


Figura 2.10: Percentatge d'estacions d'esquí viables amb neu natural als Alps Europeus actualment i en condicions de canvi climàtic (+1°, +2° i +4° C). Font: Abegg et al., 2007.

Un altre estudi a remarcar ja que és l'únic juntament amb Meier (1998) i Ecoplan-Sigmaplan (2007) que fins a dia d'avui han estimat directament els impactes econòmics del canvi climàtic sobre les estacions d'esquí és el realitzat per Bossello et al., *Le Alpi italiane e il cambiamento climatico* (Bossello et al., 2007), en la que es dona una estimació de la contracció de la facturació del sector de l'esquí sota un escenari intermedi de canvi climàtic per cada una de les regions dels Alps italians (taula 2.1).

	Contrazione % rispetto al 2030 (*)	Milioni di Euro (**)
Piemonte	-10.2	-33.12
Valle d'Aosta	-4.0	-14.30
Lombardia	-7.1	-29.11
Trentino Alto Adige	-14.1	-587.05
Veneto	-0.3	-2.46
Friuli - Venezia Giulia	-15.7	-28.91

*Valor mig dels de la variació climàtica dels quatre escenaris A1,B1,A2,B2.

* Reducció de la facturació traslladant la reducció d'estacions viables al facturat pel sector del turisme d'hivern durant el 2006.

Taula 2.1: Reducció de la facturació directa del turisme als Alps italians. Font: Bossello et al., 2007.

D'altra banda i utilitzant un enfocament diferent que la majoria d'estudis realitzats fins al moment, Uhlman, Goyette i Beniston (2007) utilitzen un model climàtic regional (RCM), de major resolució i definició en substitució dels models climàtics globals (GCM) utilitzats en la majoria dels casos. D'aquesta manera, analitzen la sensibilitat de les diferents estacions d'esquí de Suïssa a les variacions de temperatura i precipitacions projectades regionalment i de forma diferenciada per a cada una de les regions geogràfiques (figura 2.11).

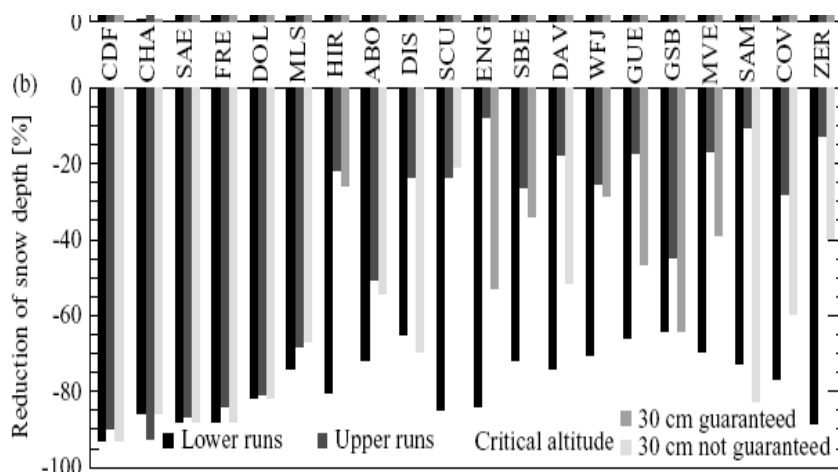


Figura 2.11: Reducció del gruix de neu en les diferents regions de Suïssa , mostrant cotes altes i baixes. Font: Uhlman et al. 2007.

Tota la literatura que s'ha comentat fins ara basa el seu anàlisi en la viabilitat de les pistes d'esquí sota condicions de neu natural i cap té en compte les possibles mesures d'adaptació a l'hora de valorar-ne la vulnerabilitat. En aquesta línia, Scott (2006) inclou per primer cop la innivació artificial per avaluar la viabilitat del sector de l'esquí a les regions canadenques d'Ontario i Quèbec (figura 2.12).

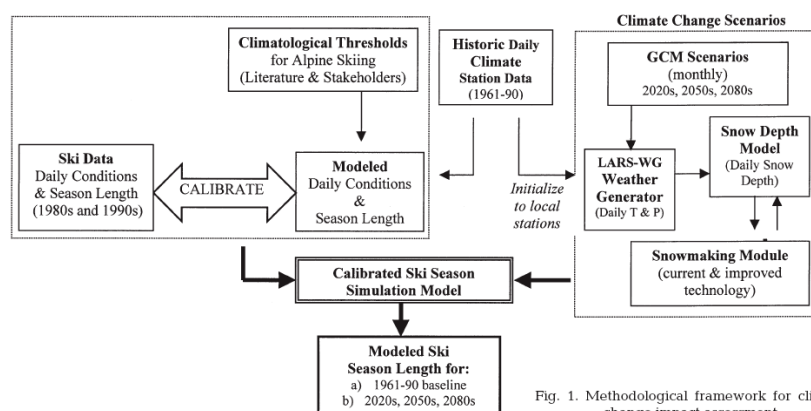


Fig. 1. Methodological framework for climate change impact assessment

Figura 2.12: Mapa conceptual d'un model que inclou la innivació artificial en la avaluació dels impactes del canvi climàtic. Font: Scott, 2006.

El fet d'incorporar aquest factor fa que el resultat de les projeccions s'adeqüin millor a la realitat, obtenint una reducció de la temporada d'esquí d' entre un 1 i un 39% mentre que anteriors estudis fets en la mateixa regió i que no tenien en compte aquest factor preveien una reducció d' entre un 40 i un 100% de la temporada (Lamothe i Périard, 1988) (taula 2.2).

Table 4
Projected changes in ski season length

Study area	Baseline average (days)	Climate change scenario	% Change from 1970s baseline	
			2020s	2050s
Québec City	160	NCARPCM-B2	-1	-5
		CCSRNIES-A1	-13	-34
Sherbrooke	152	NCARPCM-B2	-2	-7
		CCSRNIES-A1	-15	-39
Ste. Agathe-des-Monts	163	NCARPCM-B2	0	-4
		CCSRNIES-A1	-13	-32

Taula 2.2 Canvis projectats en la durada de la temporada d'esquí a Ontario, Canadà. Font: Scott, 2006.

Seguint la mateixa aproximació, Steiger (2008, 2010) analitza la vulnerabilitat i l'adaptació de les pistes d'esquí al Tirol i Bavària comparant-ne la viabilitat amb i sense innivació artificial (figura 2.13).

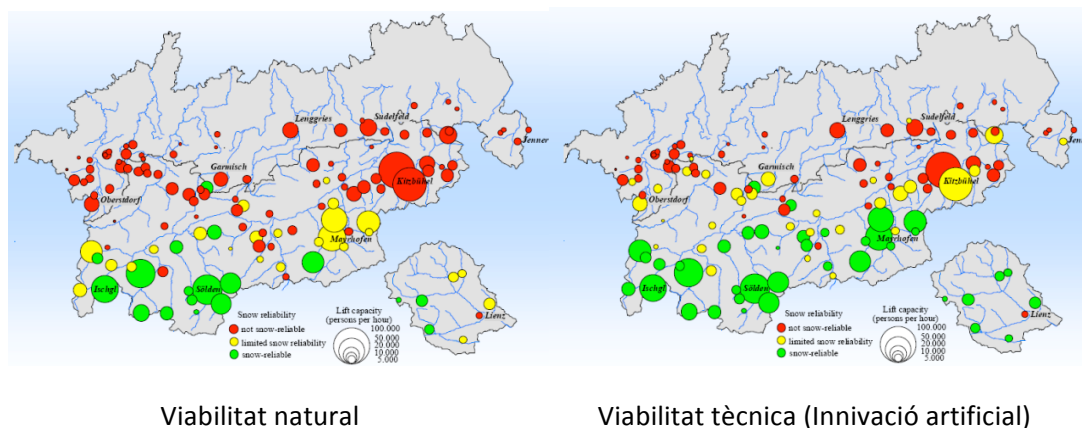


Figura 2.13: Estacions d'esquí del Tirol i Bavària viables, sota condicions de neu natural i tenint en compte la innivació artificial. Font: Steiger, 2008.

Per tant, trobem que en la literatura científica existeix una mancança d'estudis que aprofundeixin de forma sistèmica en els impactes socioeconòmics. També veiem que tret de Scott (2006), Dawson i Scott (2007) i Steiger (2008, 2010) la resta d'estudis no inclouen cap

mesura d'adaptació en els seus models. Finalment, i com assenyala David Saurí en l'Informe sobre el Canvi Climàtic a Catalunya (CADS, 2005), s'estima que al Pirineu "*...hi haurà menys neu en els dominis esquiables i un escurçament de la temporada...*", però "*...s'han de prendre com a hipòtesis ja que no existeix cap estudi que abordi mínimament el tema*". En aquesta mateixa línia, en la recent actualització de l'informe (CADS, 2010), es torna a remarcar la manca d'estudis científics que abordin el tema a nivell dels Pirineus.

D'altra banda, segons dades de Ski Andorra (Nevasport, 2005), s'estima que el negoci del sector de l'esquí mou al voltant d'uns 300 milions d'euros, el que significa unes xifres que ronden el 15% del PIB del país. A més a més, s'estima que de forma indirecta, mitjançant la influència a d'altres sectors com l'hostaleria i el comerç, el seu pes pot situar-se entorn el 40% del PIB. Per tant, veiem que el sector de l'esquí és un sector clau en l'economia andorrana i si tal i com s'ha comentat, es preveu una disminució de la temporada d'esquí i de la quantitat de neu disponible, veiem que Andorra es presenta a priori com a una regió especialment vulnerable als impactes del canvi climàtic.

3. Justificació i aportació de la tesi

En aquest context, l'estudi que es proposa pretén cobrir per una banda les mancances existents en la literatura científica i d'altra banda abordar per primer cop una temàtica d'especial transcendència per al futur d' Andorra, aportant tant coneixements pràctics com avenços metodològics.

Les dades comentades en la secció anterior de Ski Andorra sobre la contribució del sector de l'esquí en l'economia Andorrana, tot i ser orientatives, ens donen una pinzellada de la magnitud i la transcendència que aquest sector té en el global de la societat i l'economia andorrana. Per aquest motiu, saber si el sector de l'esquí i les activitats que en depenen indirectament es poden veure afectades en un futur pel canvi climàtic i quines poden ser les estratègies d'adaptació més adients, cobra un major interès pel cas d'Andorra. La forta dependència del sector de l'esquí que caracteritza l'economia andorrana fa la identificació dels possibles impactes sigui transcendent no només pel propi sector sinó també per avaluar el model de desenvolupament del país. No obstant, fins a dia d'avui no existeix cap estudi que analitzi el tema en profunditat pel cas d'Andorra ni el Pirineu en general.

Per tant, aquesta tesi pot representar una eina molt útil per les administracions públiques i els diferents actors socioeconòmics del sector privat que permeti un millor coneixement de la problemàtica i contribueixi a la difícil tasca de prendre decisions i planificar a llarg termini.

Un cop el canvi climàtic ha esdevingut una evidència científica resten molts interrogants que cal respondre. S'ha observat que el canvi climàtic tant pel que fa les temperatures com les precipitacions no és homogeni sinó que presenta una forta heterogeneïtat regional. En aquest sentit, la comunitat científica està intentant desenvolupar models regionals que siguin més fiables a l'hora d'avaluar els impactes del canvi climàtic. Un dels impactes del canvi climàtic més evidents a Andorra i al Pirineu seran els canvis en la dinàmica d'innivació. A més, considerant que el turisme de neu és un dels principals motors de l'activitat econòmica d'Andorra i en general de grans zones del Pirineu podem suposar que el canvi climàtic pot tenir importants conseqüències no tan sols físiques sinó també socioeconòmiques. Per tant, aquesta tesi doctoral no tan sols pretén cobrir un buit científic sinó que també pretén ser un important estri per les administracions i els principals actors socioeconòmics d'Andorra a fi d'adaptar-se millor al canvi climàtic. A més, cal destacar que les innovacions metodològiques emprades permetran fer avançar l'estat de l'art en aquesta temàtica.

Cal destacar que la tesi s'emmarca dins d'un projecte de la Comunitat de Treball dels Pirineus amb importants institucions tant de recerca (Centre d'estudis de neu i muntanya d'Andorra, Instituto Pirenaico de Ecología del CSIC, Insitut Geològic de Catalunya, Météo-France) com de professionals d'Andorra i d'arreu dels Pirineus (associacions de pistes d'esquí d'Andorra, Catalunya, Aragó i el Pirineu francès) el que facilitarà l'accés a dades i suport que permetrà un increment de la qualitat dels resultats. D'altra banda, el desenvolupament de la

tesi doctoral en aquest marc també facilitarà que l'impacte tangible no sigui tan sols local, a nivell d'Andorra, sinó que impliqui també a la resta del Pirineu. Finalment esmentar que la tesi es desenvoluparà sota el finançament d'una beca del departament de recerca del govern d'Andorra i de la fundació Crèdit Andorrà.

A nivell metodològic, la tesi s'integra plenament en el nou paradigma de la ciència de la complexitat, això és el conjunt de tècniques i conceptes que permeten estudiar des de noves perspectives problemes tradicionalment considerats difícils com ara tots els que integren una gran quantitat d'actors amb finalitats diferents i formes de relació variades. Els sistemes ecològics, biològics i socials, per exemple, i des de les seves múltiples escales de mesura, es caracteritzen d'aquesta manera i cal tractar-los amb eines i conceptes que queden lluny de la ciència tradicional com és ara la modelització amb agents adaptatius, les xarxes de metapoblacions, els sistemes dinàmics no lineals, etc. Actualment els estudis de problemàtiques globals i sostenibilitat tan sols poden passar per aquest nou marc conceptual si volen obtenir resultats creïbles i oferir solucions viables als problemes que estudien.

La relació entre canvi climàtic, ús del sòl, economia i mobilitat humana ofereix la possibilitat d'una recerca d'alt nivell que integri aquestes eines per desagregar els diferents actors i particularitzar-ne les seves dinàmiques. Per tant la tesi pretén desenvolupar noves metodologies, validar-les i fins i tot exportar-les a àmbits similars.

2. Objectius de la tesi

Els objectius generals d'aquesta tesi són d'una banda analitzar la vulnerabilitat del sector de l'esquí a Andorra si es complissin les projeccions de canvi climàtic, avaluant-ne tant els seus impactes sectorials com els impactes indirectes en l'economia andorrana. D'altra banda, es pretén analitzar quines són les tècniques i estratègies més adients per fer front a la possible variabilitat climàtica tenint en compte tant els costos econòmics com ambientals de diferents mesures d'adaptació.

2.1 Objectius generals

- Analitzar la vulnerabilitat al canvi climàtic de les estacions d'esquí d'Andorra.
- Analitzar les possibles estratègies d'adaptació al canvi climàtic avaluant la reducció de la vulnerabilitat de les estacions així com els seus impactes ambientals i econòmics.
- Analitzar els impactes directes del canvi climàtic sobre el sector de l'esquí a Andorra-
- Analitzar els impactes indirectes socioeconòmics del canvi climàtic a Andorra.

2.2 Objectius específics

1. Avaluació de la vulnerabilitat climàtica de les estacions d'esquí d' Andorra

- a. Evolució geogràfica de la línia de fiabilitat de la neu (SRL) sota escenaris de canvi climàtic global i regional.
- b. Estudi de cas detallat d'una estació d'esquí.

2. Modelització de la cobertura de neu

- a. Anàlisi del canvis físics deguts al canvi climàtic a Andorra i el Pirineu.
- b. Evolució de la temperatura, les precipitacions i la cobertura de neu a Andorra.
- c. Estudi de les projeccions futures de cobertura de neu al Pirineu sota escenaris de canvi climàtic per estimar la cobertura de neu a les estacions d'esquí.
- d. Actualització de l'anàlisi de vulnerabilitat amb el model de cobertura de neu.

3. Identificació de les possibles mesures d'adaptació al canvi climàtic aplicables a Andorra

- a. Mesures no estructurals / Compensacions tècniques.
- b. Mesures estructurals.

4. Anàlisi de la vulnerabilitat climàtica de les estacions d'esquí aplicant mesures tècniques d'adaptació (neu artificial)

- a. Evolució de la SRL tècnica sota escenaris de canvi climàtic.
- b. Desenvolupament de nous criteris per valorar la viabilitat d'una estació d'esquí.
- c. Avaluació de la viabilitat amb mesures d'adaptació seguint els criteris desenvolupats en el punt 4.b i el model de cobertura de neu.

5. Anàlisi de la contribució del sector de l'esquí al total de l'economia Andorrana

- a. Contribució directa.
- b. Anàlisi estructural de la distribució sectorial i la interdependència del sector de l'esquí amb altres sectors.
- c. Contribució indirecta (activitats dependents del sector de l'esquí).

6. Avaluació dels impactes socioeconòmics i ambientals directes i indirectes del canvi climàtic en el sector de l'esquí

- a. Impactes del canvi climàtic sense mesures d'adaptació.
- b. Impactes del canvi climàtic amb mesures d'adaptació.

7. Ampliació de l'anàlisi a altres estacions del Pirineu

- a. Viabilitat natural de les estacions.
- b. Viabilitat amb mesures d'adaptació.
- c. Impactes i costos del canvi climàtic.
- d. Anàlisi de la possible redistribució d'esquiadors al Pirineu.

4. Metodologia

4.1 Anàlisi de fons documentals i tractament estadístic de les dades

En una primera etapa, es realitzarà un anàlisi de fons documentals. Es farà una recopilació de la bibliografia existent que faciliti la comprensió dels canvis físics deguts a la variabilitat climàtica a Andorra i al Pirineu (els observats fins l'actualitat i els projectats per a un futur). També es recopilarà la informació relativa al sector del turisme d'hivern, (dades físiques i tècniques de les estacions, històric de turistes i esquiadors, dades econòmiques, etc...). D'altra banda també es realitzarà una recopilació de tota la bibliografia relativa a impactes del canvi climàtic en zones de muntanya, especialment en el turisme d'hivern, tècniques i estratègies d'adaptació així la caracterització i la modelització d'interaccions entre sistemes socials i ecològics. D'altra banda amb un paquet estadístic es realitzarà el tractament de les dades recopilades per adequar-les a les necessitats del model.

4.2 Tractament cartogràfic de l'àrea d'estudi

En aquesta fase, s'utilitzarà un Sistema d'Informació Geogràfica (SIG) per tal de localitzar i caracteritzar els diferents dominis esquiables d'Andorra. Aquesta eina ens facilitarà l'obtenció d'informació com són les cotes i les superfícies de les àrees esquiables o la localització dels remuntadors i els accessos, necessàries per analitzar la vulnerabilitat de les estacions i posteriorment desenvolupar el model. Mitjançant les fotografies aèries i el model digital d'elevacions (MDE) que facilita el Sistema d'Informació Geogràfica Mediambiental d'Andorra (SIGMA) i tractant-les amb un Sistema d'Informació Geogràfica, s'identificarà l'àrea de cadascun dels tres dominis d'esquí Alpí i es realitzarà una caracterització altitudinal de la superfície esquiable per intervals de cota (Figura 4.1).

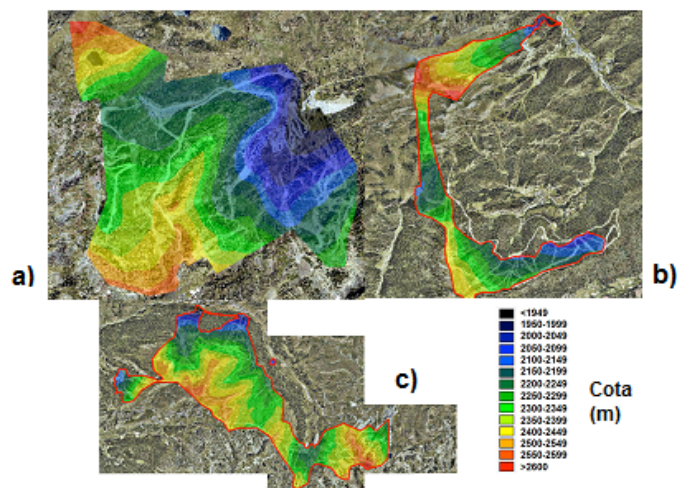


Figura 4.1: Àrea esquiable per intervals de cota. (a) Arcalís, (b) Pal-Arinsal i (c) Grandvalira.

4.3 Modelització de la interacció entre la dimensió ambiental i social

Un cop caracteritzat l'entorn físic de les estacions i els processos climatològics que els afecten, es modelitzarà la interacció entre la variabilitat climàtica projectada per models de canvi climàtic global (GCM) i regional (RCM) i el funcionament de les estacions d'esquí. Per simular la interacció entre la dimensió física i la socioeconòmica es faran servir com eines metodològiques la dinàmica de sistemes i la modelització per agents sobre un sistema d'informació geogràfica, així com la teoria de sistemes complexos per interpretar el comportament del sistema. En aquesta etapa es construïran les projeccions futures que ens permetran avaluar la vulnerabilitat i els impactes del canvi climàtic en el sector de l'esquí.

La Dinàmica de Sistemes intenta resoldre el problema de l'escassetat de dades i permet tractar amb situacions en les quals es disposa d'informació molt limitada en entorns no molt definits o desconeguts (Martin, 2003). Els models de dinàmica de sistemes, introduïts per Forrester (1961, 1968), intenten construir mitjançant diagrames causals un marc de treball teòric i permeten descriure les variables i els paràmetres que afecten a l'objecte d'estudi i com interactuen entre ells. L'Ecologia, l'Organització Industrial o l'Economia són algunes de la gran varietat de disciplines que han utilitzat aquest mètode ja que permet realitzar projeccions a partir de petits conjunts de dades convertint-se en una eina molt efectiva per tractar amb sistemes complexos de gran escala.

Per la seva banda, la modelització per agents (ABM), també coneguda com a sistemes multi-agents (MAS), és un mètode de simulació en el qual una sèrie d'agents autònoms i heterogenis (per exemple individus, animals o organitzacions) comparteixen un entorn comú. Aquests agents interactuen de forma simultània tan amb l'entorn en el qual es troben com entre els diferents agents guiats per una sèrie de normes i interessos individuals i/o comuns (Ligmann-Zielinska and Jankowski, 2007). Els models per agents geo-referenciats, és a dir, aquells en els que l'entorn en el qual interactuen els agents ha estat creat a partir de capes de sistemes d'informació geogràfica (SIG), es presenten com a especialment adequats per explorar complexes interaccions espacio-temporals dinàmiques entre sistemes ambientals i humans i permeten capturar fenòmens emergents a gran escala (macro-comportaments) a partir de accions a escala individual (micro-accions) (Railsback, 2001; Gimblett, 2002; Deadman et al., 2004; Grimm et al., 2006; Janssen et al., 2008). Per una altra banda, els ABM geo-referenciats es presenten com a un Sistema de Suport al planejament (SSP) amb un gran potencial de creixement. Aquesta metodologia és especialment adequada per la generació de escenaris, l'anàlisi de dades, la comparació de polítiques, la diagnosi de problemes i per tant la presa de decisions en processos involucrant un coneixement interdisciplinari (Ligmann-Zielinska and Jankowski, 2007; Johnson i Sieber, 2009, 2010, 2011a, 2011b; Smajgl et al., 2011).

Finalment, per tal que el model pugui representar amb el major realisme possible la interacció entre el medi físic i la dimensió socioeconòmica, es desenvoluparà conjuntament amb tècnics de les estacions d'esquí i climatòlegs especialistes en neu, criteris que permetin avaluar les condicions mínimes d'explotació d'una pista i el comportament dels esquiadors en funció de les condicions de la neu. Posteriorment, també en col·laboració amb els tècnics de

les estacions, s'estudiaran els costos i les condicions de funcionament dels sistemes de neu artificial. D'aquesta manera, s'incorporarà aquesta mesura d'adaptació al model i es tornaran a avaluar la vulnerabilitat i els impactes.

4.3 Modelització dels impactes indirectes

Una gran varietat de fenòmens es poden modelitzar com a una xarxa: l'estructura del cervell, les interaccions entre proteïnes, les interaccions socials o Internet. Tots aquests sistemes es poden representar a partir d'una sèrie de nodes i d'unes arestes connectant aquests nodes. Per exemple, pel cas d'Internet, els nodes representen els enrutadors i les arestes les connexions físiques entre ells. De la mateixa manera, en una xarxa de transport, els nodes poden representar les ciutats i les arestes les vies de comunicacions que les connecta. Aquestes arestes poden tenir diferents pesos representant així fluxos o freqüències en les interaccions entre els diferents nodes. Per exemple, representant la quantitat de cotxes que circulen per la via de comunicació. Una característica d'aquestes xarxes és que no són aleatòries si no que tenen una arquitectura més estructurada. La topologia de diferents xarxes, com per exemple les interaccions entre proteïnes o Internet són semblants, seguint una llei de potència i exhibint una estructura lliure d'escala. Per tant, la ciència de xarxes complexes pretén trobar lleis fonamentals que generen aquestes xarxes per tal de poder comprendre, modelitzar-les i caracteritzar-les (Barabási, 2002, 2009; Barabási i Bonabeau, 2003).

Així, per tal de valorar l'afectació al global de l'economia Andorrana, es pretén utilitzar la teoria de xarxes complexes per analitzar la connectivitat i la interdependència entre el sector de l'esquí i altres activitats de l'economia Andorrana.

La figura 4.2 mostra un mapa conceptual del desenvolupament de la tesi doctoral.

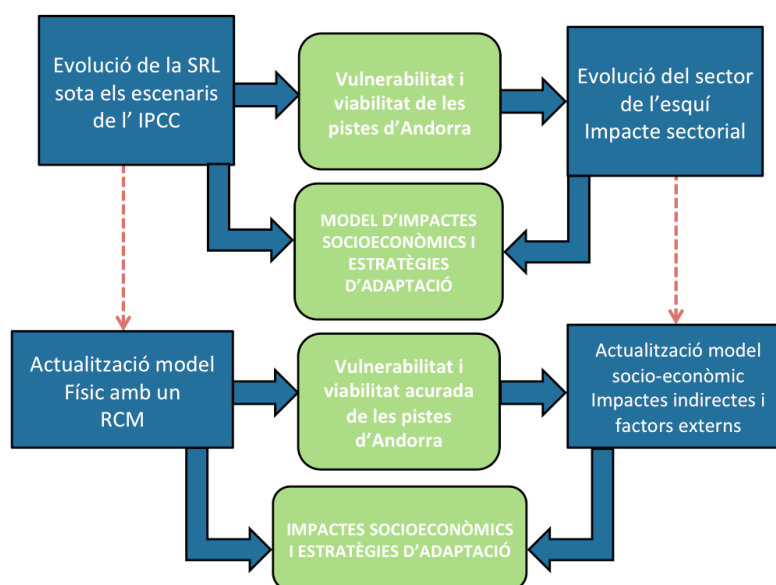


Figura 4.2 Mapa conceptual del desenvolupament de la tesi

5. Planificació, desenvolupament de la tesi i resultats obtinguts

5.1 1r Semestre - Setembre 2010 a Febrer de 2011

TREBALL DE FONS DOCUMENTALS

- Recopilació bibliogràfica i tractament dels treballs publicats fins a dia d'avui sobre:
 - Els impactes del canvi climàtic en el turisme d'hivern.
 - Evolució climatològica a Andorra i als Pirineus
 - Projeccions futures sobre la variació climàtica als Pirineus
 -
- Recopilació bibliogràfica de treballs modelitzant la interacció entre sistemes socials i ambientals mitjançant la dinàmica de sistemes, la modelització per agents i els sistemes d'informació geogràfica (SIG).
- Recopilació i tractament de sèries meteorològiques de precipitacions, temperatura i cobertura de neu a Andorra.
- Recopilació de dades socioeconòmiques del sector de l'esquí a Andorra

APRENTATGE METODOLÒGIC

- Replicació de treballs publicats que modelitzin amb dinàmica de sistemes la interacció entre sistemes socials i ambientals amb l'eina VENSIM.
- Introducció a la modelització per Agents mitjançant Macros i Netlogo

CARTOGRAFIAT DE LES ESTACIONS D'ESQUÍ

- Cartografiat de la superfície esquiable de les estacions d'esquí d'Andorra i localització dels principals equipaments.
- Contruïció de les capes SIG amb les característiques citades al punt anterior. (Figura 5.1)
- Geolocalització de les estacions d'esquí del Pirineu. (Figura 5.2)

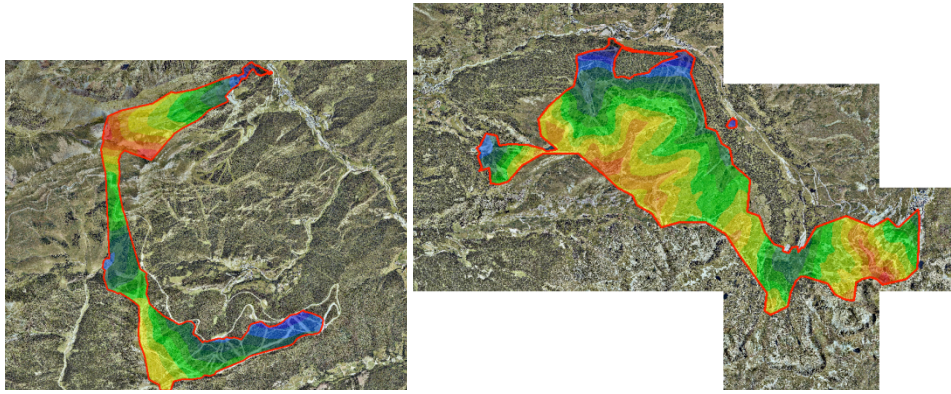


Figura 5.1: Superfícies esquiable de Pal Arinsal i GrandValira



Figura 5.2: Geolocalització de les estacions d'esquí del Pirineu

DESENVOLUPAMENT DEL MODEL

- Anàlisi de l'evolució de la línia de fiabilitat de la neu (SRL) a les diferents estacions d'Andorra. (Figura 5.3)

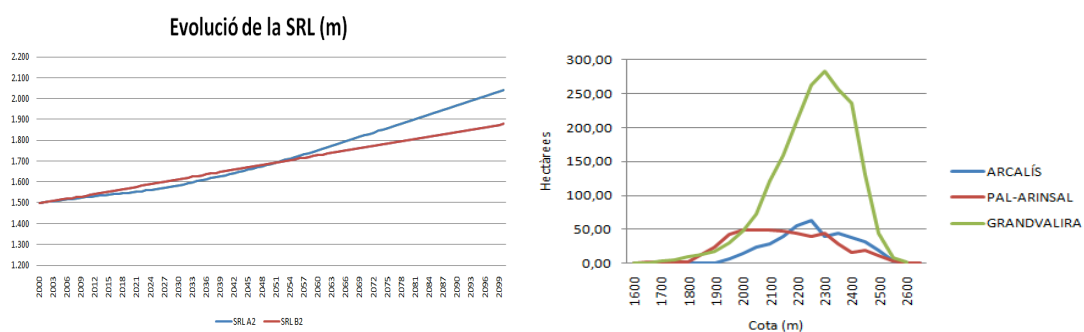


Figura 5.3: Evolució de la SRL (línia de fiabilitat de la neu) sota els escenaris A2 i B2 i distribució altitudinal de les hectàrees esquiables de les diferents estacions d'esquí.

- Creació d'un model basat en agents mitjançant macros per analitzar l'afectació dels equipaments de Pal-Arinsal i la possible resposta dels esquiadors degut a l'alteració de la cobertura de neu com a conseqüència del canvi climàtic (figura 5.4).

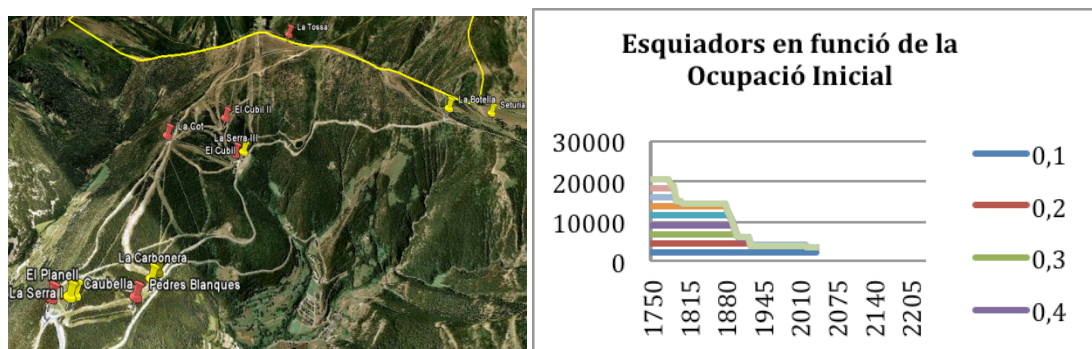


Figura 5.4: Exemple d'anàlisi de l'evolució del nombre d'esquiadors a l'estació de Pal-Arinsal en funció de l'increment de la SRL (línia de fiabilitat de la neu i del nombre inicial d'esquiadors a l'estació).

PUBLICACIONS I PRESENTACIONS EN CONGRESSOS

M. Pons, C. Pérez, B. Sureda, M. Rosas-Casals, E. Jover (2010). *Impacts of the increasing climate variability on the Andorran Winter Tourism*.

European Conference on Complex Systems. Lisboa, Portugal. Pòster. 14 de Setembre de 2010.

CURSOS I ALTRES ACTIVITATS

Postgrau en modelització amb dinàmica de sistemes

Durant el primer semestre he finalitzat el curs de postgrau en modelització amb dinàmica de sistemes que ofereix la Fundació UPC.

Complex Systems Summer School - Paris

Del 2 al 21 d'Agost de 2010 vaig cursar la Complex Systems Summer School que es va realitzar al Complex Systems Institute Paris Île-de-France (ISC-PIF) juntament amb l'École Normale Supérieure de Paris. Els cursos em van permetre introduir-me i aprofundir en l'anàlisi de la interacció entre sistemes socials i ecològics utilitzant les eines i la teoria de sistemes complexos.

Assignatures del Grau de Geografia - UAB

Durant aquest quadrimestre també vaig cursar les assignatures d'Economia, Cartografia i Geografia física corresponents al Grau de Geografia a la Universitat Autònoma de Barcelona.

5.2 2n Semestre - Març a Agost de 2011

POSADA EN MARXA DEL PROJECTE DE LA COMISSIÓ DE TREBALL DELS PIRINEUS

Durant els mesos de Gener i Febrer s'ha posat en marxa el projecte de la CTP *"La Influència del Canvi Climàtic en el Turisme de Neu al Pirineu"*. Una part de la tesi es desenvoluparà en el marc del grup de modelització d'aquest projecte liderat per l'Observatori de Sostenibilitat d'Andorra. Durant aquest període s'han fixat els objectius i s'ha fet una primera presa de contacte amb els diferents participants. Això ens ha permès accedir a informació que ha millorat la qualitat de la tesi.

PRIMER CONTACTE AMB TÈCNICS I GESTORS DE LES ESTACIONS D'ESQUÍ

S'han realitzat diverses reunions amb responsables tècnics i gestors de les estacions d'esquí d'Andorra i amb Ski Andorra per tal d'integrar la seva participació en el desenvolupament de la tesi. Durant aquestes reunions es va aconseguir el seu compromís i interès a participar en el projecte. Es van fixar punts d'especial interès per les estacions i es va fer la sol·licitud de totes les dades necessàries per al desenvolupament de la recerca.

ESTADA DE RECERCA

Del 2 de Març al 31 de Juliol he realitzat una estada de recerca al Departament de Geografia de la School of Environment, a la McGill University de Montreal, Canadà, sota la supervisió de la Dra. Renée Sieber i el Dr. Peter Johnson.

Durant aquest període he realitzat el següent treball, cursos, congressos i activitats:

TRACTAMENT DADES TURISME ANDORRA

Tractament de les dades obtingudes a partir de les enquestes nacionals de Turisme mensuals i estacionals que realitza Andorra Turisme. D'aquestes dades s'han obtingut el valor de paràmetres que es faran servir al model com el nombre mensual de turistes que esquien, el nombre d'excursionista i turistes, la pernoctació mitjana, la despesa mitjana, etc...(figura 5.5).

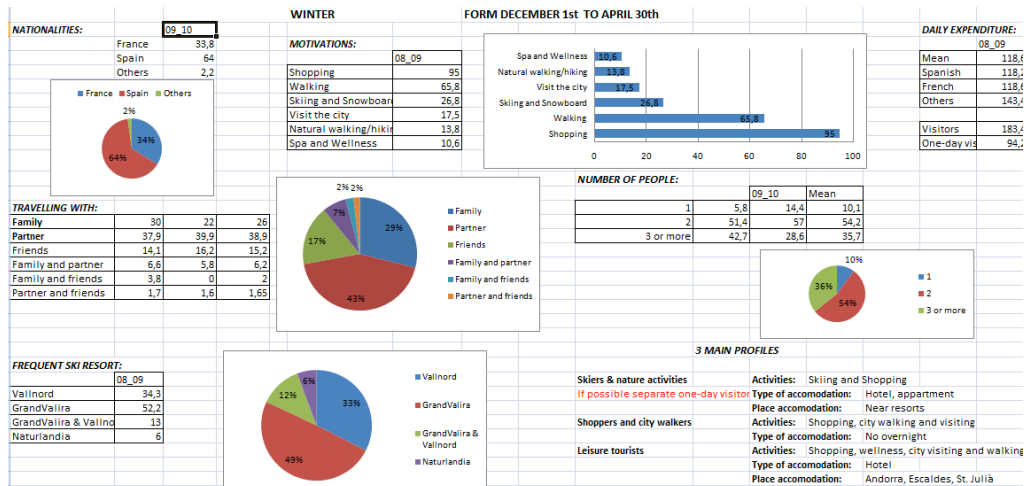


Figura 5.5: Exemple de dades extretes i tracades de l'enquesta de a turisme.

APRENTATGE METODOLÒGIC

- Aprofundiment en l'ús de Sistemes d'informació geogràfica com a eina d'anàlisi i de suport al planejament i la presa de decisions.
- Parametrització de models basats en agents mitjançant, enquestes, entrevistes i informació de camp.
- Aprenentatge en la utilització d'eines per la creació de models basats en agents incorporant sistemes d'informació geogràfica. CommunityViz, Repast i Extensio Geographica de Netelogo.
- Anàlisi de diferents marcs per definir metodològicament, construir i descriure un model basat per agents.

DESENVOLUPAMENT MODEL

- Modelització de la cobertura de neu i la durada de la temporada en les diferents estacions d'esquí. Per a realitzar aquesta part s'han utilitzat les dades facilitades pel Dr. López-Moreno de L'Institut Pireniac de Ecologia del CSIC. Les dades corresponen a les projeccions de cobertura de neu, precipitacions i temperatura al Pirineu sota diferents escenaris de canvi climàtic crades a partir d'un model de balanç energètic alimentat per un model climàtic regional (figura 5.6).

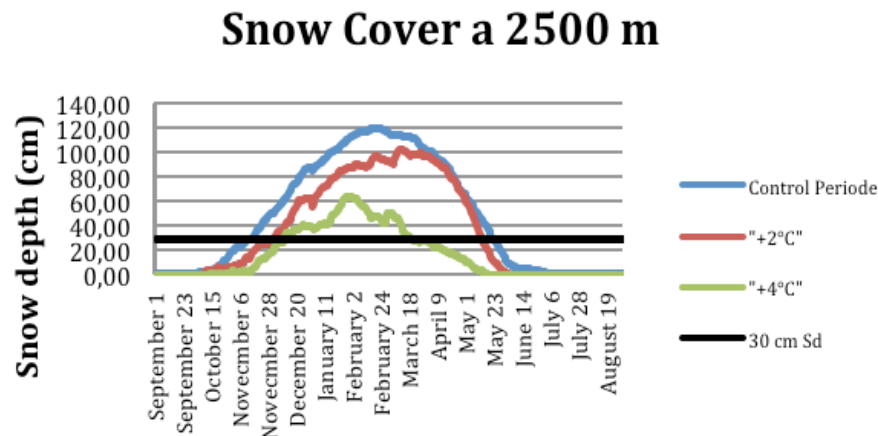
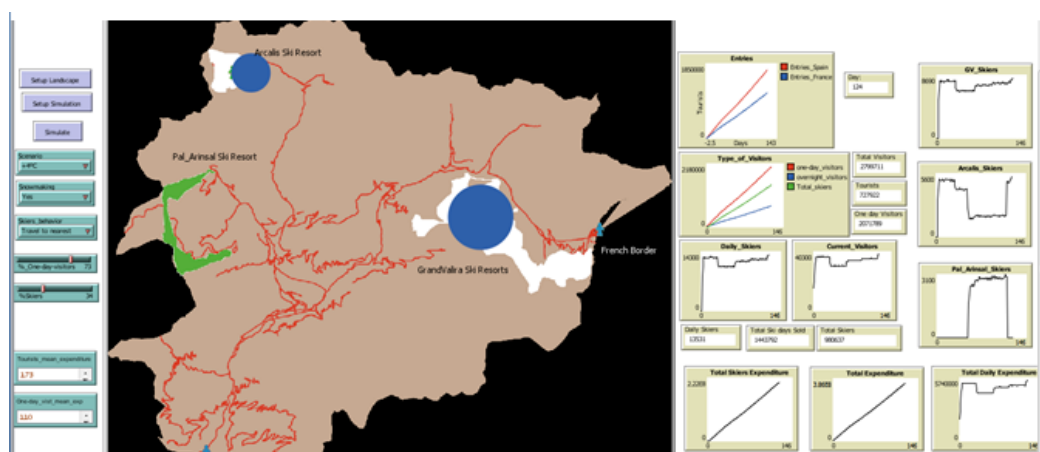


Figura 5.6: Cobertura de neu present (blau) i projectada a una estació situada a 2500 m d'alçada amb un increment de +2°C (vermell) i +4°C (verd) de la temperatura mitjana. La línia negra marca els 30 cm límit per considerar una estació viable econòmicament.

- Desenvolupament d'un model georeferenciat basat per agents mitjançant Netlogo per analitzar els impactes del canvi climàtic sobre el sector de l'esquí (figura 5.6).
- Anàlisi de les possibles mesures d'adaptació al canvi climàtic que està adoptant o podria adoptar en un futur el turisme d'hivern.
- Incorporació de l'efecte de la neu artificial a l'anàlisi d'impactes



5.6: Interfície del model desenvolupat per analitzar la vulnerabilitat i els impactes del canvi climàtic en el sector de l'esquí a Andorra.

PUBLICACIONS I PRESENTACIONS EN CONGRESSOS

M. Pons, B. Sureda, M. Rosas-Casals, E. Jover, P.A. Johnson.:(2011). ***Modelling Climate Change Impacts and Adaptation Strategies for Winter Tourism in the Pyrenees Region.***

Canadian Association of Geographers Annual Conference. Calgary, Canadà.
 Comunicació oral. 3 de Juny de 2011

M. Pons, (2011). ***Canvi Climàtic i Aigua***

XXIV Jornada Andorrana a la Universitat Catalana d'Estiu. Societat Andorrana de Ciències.
 Prada de Conflent, França. Comunicació oral. 20 d'Agost de 2011.

Pons M., et al.; ***"A georeferenced agent-based model to analyze the climate change impacts on the Andorra winter tourism"***; arXiv version (Submitted to *Environmental Modelling and Software*).

A l'Annex II s'adjunta la versió en revisió del paper.

CURSOS I ALTRES ACTIVITATS:

Global Climate Change – Harvard University

"Global Climate Change: The Science, Social Impact and Diplomacy", a la Universitat de Harvard (Massachussets, EEUU).

McGill Symposium on Environmental Research – Montreal

El 13 i 14 d'Abril vaig participar a la McGill Symposiom on Environmental Change, dedicat al canvi ambiental global.

Teaching and Learning Workshop – CAG - Universitat de Calgary

Workshop sobre com desenvolupar el programa, les activitats i l'avaluació d'una assignatura.
 Tècniques i estils d'ensenyament i aprenentatge. 3 de Juny

ESRI – Center for Geographic Analysis University of Harvard

Durant aquest quadrimestre he començat els cursos:

- *Creating and Integrating Data for Natural Resource Applications*
- *Spatial Analysis with ArcGis*

5.3 3r Semestre - Setembre 2011 a Febrer 2012

- Reajustament i validació del model i dels paràmetres utilitzats al model d'impactes juntament amb informació dels tècnics de les estacions.
- Incorporació al model de la resposta i el comportament dels esquiadors
- Creació de nous criteris per analitzar la vulnerabilitat de les estacions

5.4 4t Semestre - Març a Agost 2012

- Avaluació de la viabilitat de les estacions d'esquí adaptant mesures d'adaptació i seguint els criteris de viabilitat desenvolupats amb els tècnics de les pistes.
- Estimació de la contribució econòmica directa del sector de l'esquí
- Anàlisi estructural de la distribució sectorial i de la interdependència entre el sector de l'esquí i altres sectors de l'economia Andorrana mitjançant l'anàlisi de xarxes.
- Avaluació dels impactes socioeconòmics i ambientals directes i indirectes deguts al canvi climàtic

5.5 5é Semestre Setembre 2012 a Febrer 2013

- Ampliació de l'anàlisi a altres estacions del Pirineu
- Ampliació del model a altres impactes del canvi climàtic a Andorra (subjecte a la disponibilitat de temps)

5.6 6é Semestre Març 2013 a Agost 2013

- Ampliació del model a altres impactes del canvi climàtic a Andorra (subjecte a la disponibilitat de temps)
- Redacció i defensa de la Tesi

6. Bibliografia

Abegg B (1996). Klimaänderung und Tourismus. Klimafolgenforschung am Beispiel des Wintertourismus in den Schweizer Alpen. vdf Zurich, Zurich.

Abegg B, Agrawala S, Crick F, de Montfalcon A (2007). Climate change impacts and adaptation in winter tourism. In: Climate change in the European Alps: adapting winter tourism and natural hazards management. Paris: Organization for Economic Co-operation and Development.

ACACIA (2000). Tourism and recreation. In: Parry M (ed) Assessment of potential effects and adaptations for climate change in Europe. Jackson Environment Institute, University of East Anglia, Norwich.

Aspen Global Change Institute (2006). Climate Change and Aspen: an assessment of impacts and potential responses. Aspen Global Change Institute, Center of the American West, The Rural Planning Institute, Stratus Consulting Inc., Wildlife and Wetland Solutions, LLC.

Barabási, A.-L. (2009). Scale-Free networks: A decade and beyond. *Science*, 325(5939),412-413.

Barabási, A.-L. (2002). *Linked: The New Science of Networks*. Basic Books, 1st edition.

Barabási, A.-L. L. and Bonabeau, E. (2003). Scale-free networks. *Scientific American*, 288(5),60-69.

Becker, A. and Bugmann, H. (eds.) (1997). Predicting Global Change Impacts on Mountain Hydrology and Ecology: Integrated Catchment Hydrology/Altitudinal Gradient Studies, IGBP Report 43, Stockholm.

Beniston, M., (2003). Climatic change in mountain regions: a review of possible impacts. *Climatic Change* 59, 5-31.

Blanc, C., (2008). Ski resorts in 2020: How to face the future? 5th World Congress on Snow and Mountain Tourism, Andorra.

Bosello, F., Marazzi, L., & Nunes, P. A. L. D. (2007a). Le Alpi italiane e il cambiamento climatico: Elementi di vulnerabilità ambientale ed economica e possibili strategie di adattamento. CMCC/APAT.

Breiling, M., Charamza, P., (1999). The impact of global warming on winter tourism and skiing: a regionalised model for Austrian snow conditions. *Regional Environmental Change* 1 (1), 4–14.

Bürki, R., Elsasser, H., Abegg, B, (2003). Climate change and Winter Sports: Environmental and Economic Threats. 5th World Conference on Sport and Environment, Torí 2-3 December 2003.

Burki, R., Elsasser, H., Abegg, B., König, U., (2005). Climate change and tourism in the Swiss Alps, In: eds., HallM. and Higham J. Aspects of Tourism. Tourism, recreation and climate change, pp. 155-163.

CADS (2005). Informe sobre el canvi climàtic a Catalunya. Consell Assessor per al Desenvolupament Sostenible. Generalitat de Catalunya.

CADS (2010). Segon Informe sobre el canvi climàtic a Catalunya. Consell Assessor per al Desenvolupament Sostenible. Generalitat de Catalunya.

Cayan, D. R. (1996). Interannual Climate Variability and Snow Pack in the Western United States', *J. Climate* 9, 928–948.

Cayan, D. R., Kammerdierner, S. A., Dettinger, M. D., Caprio, J. M., and Peterson, D. H. (2001). Changes in the Onset of Spring in the Western United States, *Bull. Amer. Meteorol. Soc.* 82, 399–415.

- Chinn, T. (1996). New Zealand Glacier Responses to Climate Change of the Past Century, *New Zealand Journal of Geology and Geophysics* 39, 415–428.
- CIPRA, Commission Internationale pour la Protection des Alpes, (2003). Aufrüstung im Alpenen Wintersport : ein Hintergrundbericht. Disponible a :<http://www.alpmedia.net>.
- Clarimont, S., (2008). Turismo de invierno y cambio climático: la producción de nieve artificial en los Pirineos, ¿un uso sostenible del agua?. 6º Congreso Ibérico sobre Gestión y Planificación del Agua, Vitoria, Federación Nueva Cultura del Agua - Universidad del País Vasco.
- Deadman P, Robinson D T, Moran E, Brondizio E, (2004,). Colonist household decisionmaking and land-use change in the Amazon Rainforest: an agent-based Simulation. *Environment and Planning B - Planning and Design* 31, 693-709
- Ecoplan/Sigmaplan (2007). Auswirkungen der Klimaänderung auf die Schweizer Volkswirtschaft (nationale Einflüsse). Auftraggeber Bundesamt für Umwelt (BAFU) und Bundesamt für Energie (BFE).
- EEA, European Environment Agency, (2009). Regional Climate Change and Adaptation. Copenhagen.
- Elssasser H, Bürki R (2002). Climate change as a threat to tourism in the Alps. *Climate Research* 20, 253-257
- Esteban, P.; Prohom, M. J.; Aguilar, E.; Mestre, O., (2009). Evolució recent de la temperatura i de la precipitació a Andorra (1934-2008): Andorra: CENMA.
- Etchevers P, Martin E., (2002). Impact d'un changement climatique sur le manteau neigeux et l'hydrologie des bassins versants de montagne. International Meeting "L'eau en montagne", Mégève, 8.
- Fitzharris, B. B., Allison, I., Braithwaite, R. J., Brown, J., Foehn, P., Haeberli, W., Higuchi, K., Kotlyakov, V. M., Prowse, T. D., Rinaldi, C. A., Wadhams, P., Woo, M. K., and Youyu Xie, (1996). The Cryosphere: Changes and their Impacts, in Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Chapter 5, Cambridge University Press, pp. 241–265.
- Föhn, P., (1990). Schnee und Lawinen. In: Schnee, Eis und Wasser der Alpen in einer wärmeren Atmosphäre, Internationale Fachtagung, Mitteilungen VAW ETH Zurich 108, 33-48.
- Forrester, J.W., (1961). Industrial Dynamics. The MIT press, Cambridge.
- Forrester, J.W., (1968). Principles of systems. Productivity Press, Cambridge.
- Fukushima T., Kureha M., Ozaki N. et al. (2003). Influences of air temperature change on leisure industries: case study on ski activities. *Mitigation and Strategies for Climate Change* 7, 173-189
- Galloway, R., (1988). The potential impact of climate change on Australian ski fields. In Pearman G (ed) Greenhouse: planning for climatic change. CSIRO, Melbourne
- Gesellschaft für ökologische Forschung. Base de dades de fotografies que documenten l'evolució de les glaceres als Alps, <http://www.oekologische-forschung.de/>, últim accés Març de 2010.
- Gimblett, H. R., S. Cable, D. Cole & R. M. Itami. (2005). Recreation Visitation and Impacts in the Bighorn Crags Portion of the Frank Church – River of No Return Wilderness. In Cole, David N. (compiler). Computer Simulation Modeling of Recreation Use: Current Status, Case Studies, and Future Directions. Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-143. Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. September 2005.
- Grabherr, G., Gottfried, M., and Pauli, H. (1994). Climate Effects on Mountain Plants, *Nature* 369, 448.

Grimm, V., U. Berger, F. Bastiansen, S. Eliassen, V. Ginot, J. Giske, J. Goss-Custard, Grand, T., Heinz, S. K., and Huse, G. (2006). A standard protocol for describing individual-based and agent-based models. *Ecological Modelling* 198, no. 1-2: 115-126.

Haeberli, W. and Beniston, M., (1998)- Climate Change and its Impacts on Glaciers and Permafrost in the Alps, *Ambio* 27, 258–265.

Hahn, F., (2004). L'enneigement artificiel dans l'arc alpin : Rapport de synthèses. CIPRA Internationale Alpenschutzkommission. Disponible a www.cipra.org.

Hamilton L, Rohall D, Brown B et al (2003). Warming winters and New Hampshire's lost ski areas: an integrated case study. *International Journal of Sociology and Social Policy* 23(10), 52-73

Hamilton, L, Brown, C., & Keim, B. D. (2007). Ski areas, weather and climate: Time series models for New England case studies. *International Journal of Climatology*, 27, 2213–2124.

Hansen-Bristow, K. J., Ives, J. D., and Wilson, J. P. (1988), 'Climatic Variability and Tree Response within the Forest-Alpine Tundra Ecotone', *Annals of the Association of American Geographers* 78, 505–519.

Hennessy K, Whetton P, Smith, I., Bathols, J., Hutchinson, M., and Sharples, J. (2003). The impact of climate change on snow conditions in mainland Australia. CSIRO Atmospheric Research, Aspendale, Australia

Heo, I., and Lee, S., (2008). The Impact of Climate Changes on Ski Industries in South Korea – In the case of the Yongpyong Ski resort. *Journal of the Korean geographical society* 43 (5), 715-727

Huntley, B., (1991). How Plants Respond to Climate Change: Migration Rates, Individualism and the Consequences for Plant Communities', *Ann. Botany* 67, 15–22

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2007). Climate change 2001: synthesis report. Summary for policy makers. Fourth Assessment Report. United Nations Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2007). Climate change 2007: synthesis report. Summary for policy makers. Fourth Assessment Report. United Nations Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva

Itami, R., R. Raulings, G. MacLaren, K. Hirst, R. Gimblett, D. Zanon, P. Chladek (2002). RBSim 2: Simulating the complex interactions between human movement and the outdoor recreation environment. In Monitoring and Management of Visitor Flows in Recreational and Protected Areas Conference Proceedings, A. Arnberger, C. Brandenburg, A. Muhar, editors. Institute for Landscape Architecture and Landscape Management University of Agricultural Sciences, Vienna, Austria, 30 Jan – 02 Feb 2002, 191-198.

Janssen, M. A. (2009). Understanding artificial anasazi. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 12.

Johnson, E. A., (1992). Fire and Vegetation Dynamics. Studies from the North American Boreal Forest, Cambridge University Press, Cambridge.

Johnson P. A., Sieber R. E., (2009,). Agent-based modelling: A dynamic scenario planning approach to tourism PSS. In Planning Support Systems: Best Practices and New Methods Eds S Geertman, J Stillwell (Springer, Berlin), 211-226

Johnson P. A., Sieber R. E., (2010). An Individual-Based Approach to Modeling Tourism Dynamics. *Tourism Analysis* 15

- Johnson, P. A., Sieber, R. E., (2011a). An agent-based approach to providing tourism planning support. *Environment and Planning B*. 38(3), 486-504.
- Johnson, P. A., Sieber, R. E., (2011b). Negotiating constraints to the adoption of agent-based modeling for tourism planning in Nova Scotia. *Environment and Planning B*. 38(2), 307-321
- Keller, F., Kienast, F., and Beniston, M. (2000). Evidence of the Response of Vegetation to Environmental Change at High Elevation Sites in the Swiss Alps. *Regional Env. Change* 2, 70–77
- König, U., (1998). Tourism in a warmer world: implications of climate change due to enhanced greenhouse effect for the ski industry in the Australian Alps. *Wirtschaftsgeographie und Raumplanung* 28 University of Zurich
- König U, Abegg B (1997). Impacts of climate change on tourism in the Swiss Alps. *Journal of Sustainable Tourism* 5(1), 46-58
- Lamothe I Périard Consultants, (1988). Implications of climate change for downhill skiing in Québec. *Climate Change Digest* 88-03. Environment Canada, Ottawa
- Lavaud, J., (2008). L'impact du changement climatique en Midi-Pyrénées, Exemple de la chaîne des Pyrénées. l'Agence Régionale Pour l'Environnement de Midi-Pyrénées.
- Ligmann-Zielinska, A, Jankowski, P. (2007). Agent-based models as laboratories for spatially explicit planning policies, *Environment and Planning B*: 34(2), 316-335
- Lipski S., McBoyle G., (1991). The impact of global warming on downhill skiing in Michigan. *East Lakes Geographer* 26: 37-51
- López-Moreno, J.I., Goyette, S., Beniston, M., Alvera, B., (2008). Sensitivity of the snow energy balance to climatic changes: implications for the evolution of snowpack in the Pyrenees in the 21st century. *Climate Research* 36 (3), 203– 217.
- López-Moreno, J.I., Beniston, M., (2009). Daily intensity precipitation for the 21st century: seasonal changes over an Atlantic-Mediterranean gradient in the Pyrenean mountains. *Theoretical and Applied Climatology* 95, 375–384.
- López-Moreno, J.I., Goyette, S., Beniston, M., (2009). Impact of climate change on snowpack in the Pyrenees: Horizontal spatial variability and vertical gradients. *Journal of Hydrology*, 374, 384–396
- Martin, J., (2003). Teoría I ejercicios prácticos de dinámica de sistemas.
- Martin, E. and Durand, Y. (1998), Precipitation and Snow Cover Variability in the French Alps, in: Beniston, M. and Innes, J. L. (eds.), *The Impacts of Climate Change on Forests*, Springer-Verlag, Heidelberg/New York, pp. 81–92.
- Meier, R., (1998). Sozioökonomische Aspekte von Klimaänderungen und Naturkatastrophen in der Schweiz (Projektschlussbericht NFP 31). Zurich: Vdf Hochschulverlag
- Nevasport. Impacto del sector del esquí en Andorra. Notícia del 24-8-2004 a nevasport.com
- Ozenda, P. and J.-L. Borel (1991), *Les Conséquences Ecologiques Possibles des Changements Climatiques dans l'Arc Alpin*, Rapport Futuralp No. 1, International Centre for Alpine Environment (ICALP), Le Bourget-du-lac, France

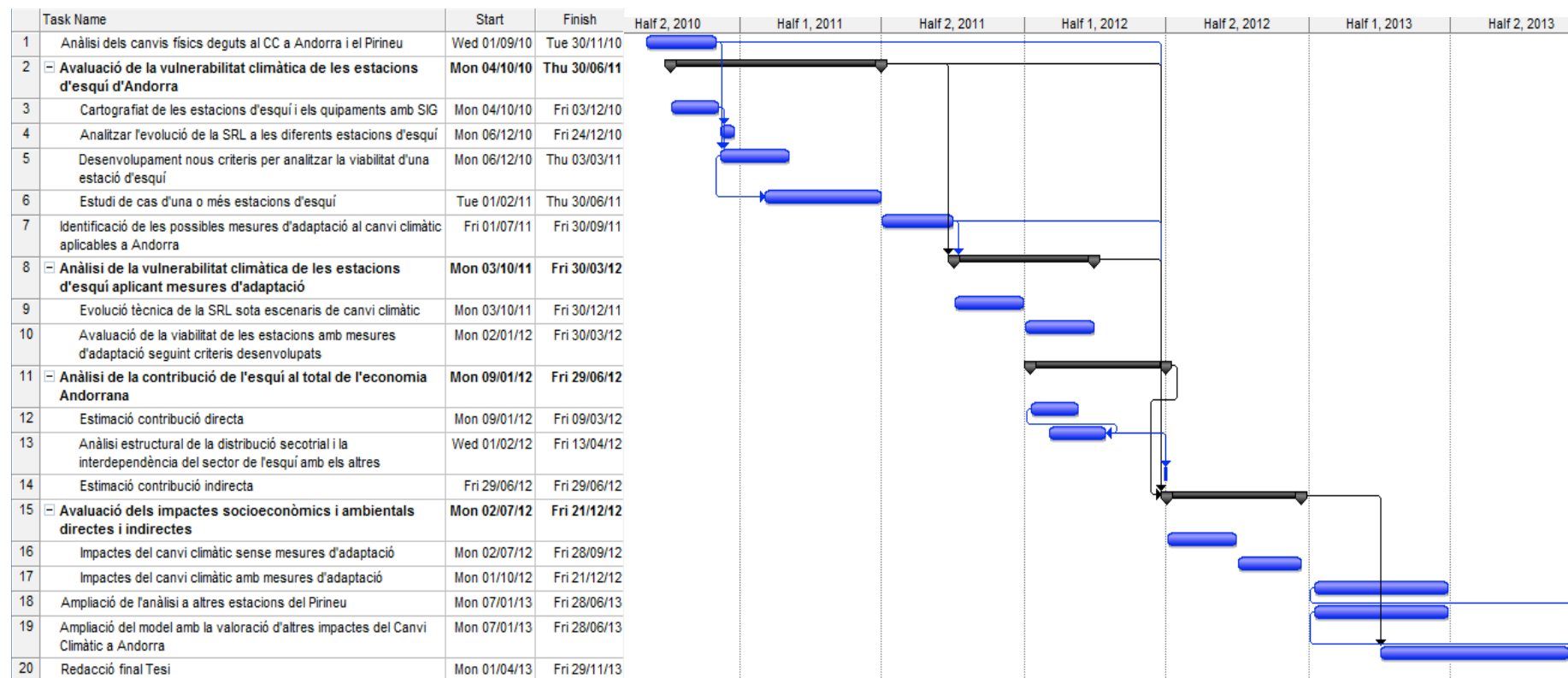
- Peters, R. L. and Darling, J. D. S. (1985). The Greenhouse Effect and Nature Reserves: Global Warming Would Diminish Biological Diversity by Causing Extinctions among Reserve Species, *Bioscience* 35, 707–717
- Planton, S., (2008). Le changement climatique: de la planète à la région Midi-Pyrénées Météo-France, CNRM/GAME
- Price, M. F., (1990). Temperate Mountain Forests: Common-Pool Resources with Changing, Multiple Outputs for Changing Communities. *Natural Resources Journal* 30, 685–707.
- Railsback, S.F., (2001). Concepts from complex adaptive systems as a framework for individual-based modelling. *Ecol. Model.* 139, 47–62
- Scholl, H. J., (2001). Agent-based and systems dynamics modeling: A call for cross study and joint research. 34th Hawaiian International Conference on System Sciences, Maui, HI.
- Scott, D., Dawson, J., Jones, B. (2008). Climate change vulnerability of the US Northeast winter recreation-Tourism sector. *Mitigation Adaptation Strategies for Global Change*, 13, 577–596
- Scott, D., McBoyle, G. (2007). Climate change adaptation in the ski industry. *Mitigation and Adaptation Strategies to Global Change*, 12(8), 1411–1431
- Scott, D., McBoyle, G., Mills, B. (2003). Climate change and the skiing industry in southern Ontario (Canada): Exploring the importance of snowmaking as a technical adaptation. *Climate Research*, 23, 171–181
- Scott, D, McBoyle, G., Mills, B., & Minogue, A. (2006). Climate change and sustainability of ski-based tourism in eastern North America: A reassessment. *Journal of Sustainable Tourism*, 14(4), 376–398
- Scott, D., McBoyle, G., Minogue, A. (2007). The implications of climate change for the Québec ski industry. *Global Environmental Change*, 1, 181–190
- Shih, C., Nicholls, S., & Holecek, D. F. (2009). Impact of weather on downhill ski lift ticket sales. *Journal of Travel Research*, 47(3), 359–372
- Smajgl, A., Brown, D. G., Valbuena, d., and Huigen, M. G. A. (2011). Empirical characterisation agent behaviours in socio-ecological systems. *Environmental Modelling and Software* 26, 837-844
- Steiger R, Mayer M (2008) Snowmaking and climate change. Future options for snow production in Tyrolean ski resorts. *Mt Res Dev* 28, 292–298
- Steiger, R. (2010). The impact of climate change on ski season length and snowmaking requirements in Tyrol, Austria. *Climate Research*, 43(3), 251-262
- Uhlmann, B., Goyette, S., Beniston, M., (2009). Sensitivity analysis of snow patterns in Swiss ski resorts to shifts in temperature precipitation and humidity under condition of climate change. *International Journal of Climatology* 29, 1048–1055
- Whiteman, D. (2000). Mountain Meteorology, Oxford University Press, 355 pp.
- Witmer, U., (1986). Erfassung, Bearbeitung und Kartierung von Schneedaten in der Schweiz. *Geographica Bernensia* G25
- World Tourism Organization (2003). Climate change and tourism. Proceedings of the First International Conference on Climate Change and Tourism. Djerba, 9-11 April 2003

World Tourism Organization (WTO) i United Nations Environment Programme (UNEP) (2008). Climate change and Tourism. Responding to Global Challenges, Madrid: WTO/UNEP

Zemp, M., Haeberli, W., Hoelzle, M., Paul, F. (2006). Alpine glaciers to disappear within decades? *Geophysical Research Letters*, Vol. 33, L13504

ANNEX 1

DIAGRAMA DE GANTT DE LA PLANIFICACIÓ DE LA TESI DOCTORAL



A georeferenced Agent-Based Model to analyze the climate change impacts on the Andorra winter tourism.

M. Pons-Pons^{1,2}, P.A. Johnson³, M. Rosas-Casals¹, B. Sureda¹, E. Jover²

¹Sustainability Measurement and Modeling Lab (Summlab). Technical University of Catalonia, Barcelona, Spain

²Sustainability Observatory of Andorra, Andorra

³Department of Geography, McGill University, Montreal, Canada

ABSTRACT

This study presents a georeferenced agent-based model to analyze the climate change impacts on the ski industry in Andorra and the effect of snowmaking as future adaptation strategy. The present study is the first attempt to analyze the ski industry in the Pyrenees region and will contribute to a better understanding of the vulnerability of Andorran ski resorts and the suitability of snowmaking as potential adaptation strategy to climate change. The resulting model can be used as a planning support tool to help local stakeholders understand the vulnerability and potential impacts of climate change. This model can be used in the decision-making process of designing and developing appropriate sustainable adaptation strategies to future climate variability.

1. INTRODUCTION

Mountain regions are especially vulnerable to climate change. The rapid retreat of glaciers, important changes in snowfalls and shifts in biodiversity amount and distribution are some examples that highlight the remarkable sensitivity of mountain ecosystems (Beniston, 2003; IPCC, 2007). Moreover, in many mountain economies, reliable snow cover plays a key role as an important resource for the winter tourism industry, the main income source and driving force of local development in such regions (WTO, 2003; Beniston, 2003). Winter tourism industry has been identified by governmental climate assessments as potentially vulnerable to climate change (Canada Country Study, 1998; ACACIA, 2000; US National Assessment Team, 2000; WTO, 2003; IPCC, 2007; CADS, 2010). In recent years many studies have analyzed the impacts of climate change on the ski industry in regions such as the European Alps (König and Abegg, 1997; Breiling and Charamza, 1999; Elssasser and Bürki, 2002; Abegg et al., 2007; Steiger, 2008, 2010; Uhlman et al., 2009), Canada (McBoyle and Wall, 1987; Lamothe and Périard, 1988; Scott et al., 2003, 2006, 2007), USA (Lipski and McBoyle, 1991; Hayhoe et al., 2004; Casola et al., 2005; Dawson and Scott, 2007; Scott et al., 2008; Dawson et al., 2009), Sweden (Moen and Fredman, 2007), Australia (Galloway, 1988; Henessy et al., 2003; Bicknell and Magnus, 2006), Japan (Fukushima et al., 2002), and South Korea (Heo and Lee 2010). All these studies indicate to a greater or lesser extent that climate change will lead to impacts such as ski season length reductions, loss of skiable areas and drop of visitors both in low altitude and low latitude ski resorts.

In this context, although the Pyrenean region is presented as one of the most important ski areas in Europe after the Alps, covering the north of Spain, the south of France and Andorra, the vulnerability of this ski industry still remains unexplored (Scott and McBoyle, 2007; CADS 2010; Yang and Wan 2010).

This paper analyzes, , the potential reduction of the season length in Andorran ski resorts due to climate change, as well as the subsequent drop in number of skiers and expenditures. This ABM also takes into account the adaptive effect of snowmaking on future season length. ABM, also known in some disciplines as Multi-Agents Systems (MAS), is defined as a simulation method in which autonomous and heterogeneous agents (i.e., individual people, animals or organizations) share a common environment. These agents interact simultaneously both upon a landscape and among each other led by a self-interest or com-mon-interest (Berger et al, 2002a; Torrens, 2003; Ligmann-Zielinska and Jankowsk, 2007). Spatially referenced ABM appears as a promising approach for exploring complex space-time dynamic interactions between coupled human and environmental systems and capturing emergent macro-level phenomena from micro-level individual actions (Railsback, 2001; Gimblett, 2002; Bousquet and LePage, 2004; Deadman et al., 2004; Grimm et al., 2006; Janssen et al., 2008). In recent years spatially referenced ABM have been used to analyze a broad spectrum of spatial phenomena such as the water management (Feuillette et al., 2003; Farolfi et al., 2010), the dynamics in ancient human and primate societies (Kohler, et al. 1999, Axtell et al. 2002; Janssen 2009), the land use and land cover change (Benenson and Torrens, 2004, Parker, 2005; Deadman et. Al, 2004, Manson and Evans 2007), the

effects of environmental changes on market systems (Werner and McNamara, 2007), the global change impacts on water cycle (Barthel et al., 2008), the residential segregation in a city (Crooks, 2010) or the spreading of a pine beetle infestation (Perez and Dragizevic, 2010). However, because of the novelty of this technique only few studies have applied a georeferenced ABM to model tourism phenomena (Itami et al. 2002, Gimblett et al., 2005; Johnson and Sieber, 2009, 2010, 2011; Anwar et al., 2007).

On the other hand, georeferenced ABM is presented as a Planning Support System (PPS) tool with a growth potential. This approach is well-suited for scenario development, data analysis, problem diagnosis and policy comparison (Ligmann-Zielinska and Jankowski, 2007; Johnson and Sieber, 2009, 2010, 2011; Farolfi et al., 2010). Moreover, the enhancement and the understanding of the interplay between social and ecological systems such as human responses to environmental changes or the impact of their actions upon it can support the decision-making processes by involving cross-disciplinary knowledge (Smaijl et al., 2011).

STUDY AREA

Andorra is a small and mountainous country located in the middle of the Pyrenees between France and Spain, with a population of nearly 75000 inhabitants. Andorra receives more than 10 million of tourists visit every year (Andorra Turisme 2009). Within this context, winter tourism is presented as one of the main income sources and driving force of local development, directly contributing about 15% of the national gross domestic product (GDP). Taking into account the related and interdependent activities such as hotels, shopping

and other tourism facilities, the indirect contribution from winter tourism can be extended to 40% of the GDP. Due to this strong reliance of the Andorran economy on winter tourism, it is critical to evaluate the extent of climate change on the ski industry. A central concern is the possibility that skiing would no longer be viable even with adaptation strategies, such as artificial snowmaking. This has become a critical issue not only to assess the sustainability of the ski industry, but to assess the sustainability of the current development model of the entire country.

1. MODEL DESCRIPTION

1.1PURPOSE

The main goal of this study is to analyze, by means of a geo-referenced ABM, the potential reduction of the ski season length in the Andorran Ski resorts due to climate change and the subsequent drop of skiers and their expenditure in the region. The model also takes into account the effects of artificial snowmaking on enhancing the snow cover and extending the future season length.

2.2 ENVIRONMENT

The environment, that is the space upon the agents (skiers) interact and respond to its changes, is implemented using 4 Geographic Information System (GIS) layers: (1) the limits of the country, (2) the entrance points (borders) to Andorra, (3) the main roads connecting the entrance points and (4) the ski resorts access and the surface area of the three ski resorts: Grandvalira, Arcalís and Pal Arinsal (Figure 1). This latter layer changes over time in basis of the

snow cover conditions and determines the season length according to the daily snowpack available in the resort. The other layers remain static during the simulation.

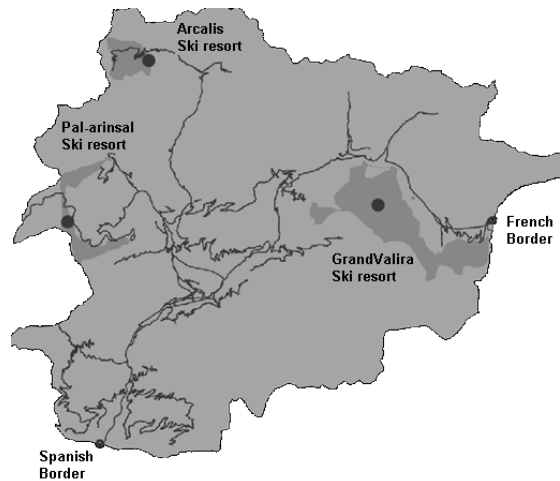


Figure 1

2.2.1 Natural Snow Cover and Season length

The future natural snow cover at each ski resort is modeled using the projected changes in the Pyrenean daily snowpack during the 21st Century from López-Moreno et al. (2009). This study simulates the snow depth and the snow duration running a Surface Energy Balance Model (GRENBLS, Keller et al., 2005) with climatic inputs provided by the HIRHAM Regional Climate Model (Christensen et al., 1998). These projections are based on two future emissions scenarios: the SRES A2 and B2 scenarios (IPCC 2007) and for different altitudinal levels (1500, 2000, 2500, and 3000 m a.s.l.). The ski season length has been simulated using the snowpack projection at the mean elevation of each ski resort and applying a 30 cm threshold. This threshold is one of the most used criterion to assess the climate change vulnerability of ski resorts, the

100-day rule (Witmer, 1986; Abegg, 1996; Abegg et al., 2007; Scott, 2003; Scott and Dawson, 2007; Steiger, 2010). This refers to a standard definition for snow reliability assuming that 100 days per season with at least 30 cm of snow depth are required for a ski resort to be economically viable (Scott et al. 2003, Steiger 2010). Applying this criterion, the future season length has been estimated considering those days that the snow cover depth is at least 30 cm. Figure 2 shows the present (control period) and future snow cover (assuming a 2°C and 4°C increase of the average temperature) at Andorran ski resorts located at 2000 and 2500 m of elevation. The grey area marks the 30 cm threshold showing those days that the snow cover is below the threshold. Once the snow cover reaches this 30 cm value, it is assumed that the ski resort is open.

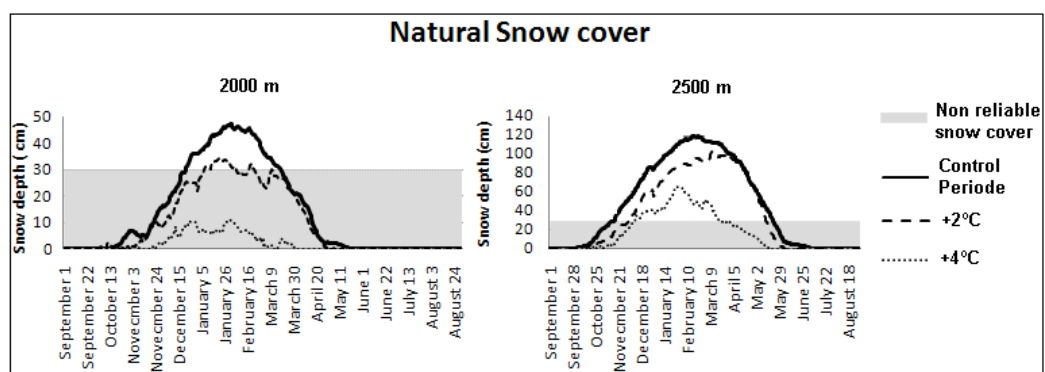


Figure 2

2.2.2 Snowmaking module

Over the last few decades, mainly through high public funding and subsidies, ski resorts across the world have invested huge amounts of money in artificial snow production systems (Steiger, 2008; Clarimont, 2008). This adaptation strategy is intended to offset the variability of the snowfalls guaranteeing good ski conditions, scheduled openings, and stable revenues

throughout the years. However, it is important to point out that these investments are not only motivated by climate variability. Snowmaking has also been used as a commercial and image strategy to extend the season and offer better snow conditions with the aim to increase revenues (Steiger 2008).

In order to achieve a more realistic projection of the ski season length, the model includes a snowmaking module simulating the effect of these systems in the enhancement of the snow cover. In this model, only the snowmaking to assure the minimum snow conditions has been simulated. The module simulates that a maximum of 10 cm of snow are produced each day as long as the natural snow cover is below the 30 cm threshold. On the other hand, only those days with a minimum temperature of -5°C are considered as potential snowmaking days (Scott 2003, Steiger 2010). Figure 3 shows the potential enhancement of the natural snow cover at 2000 m following the defined parameters in two different future scenarios ($+2^{\circ}\text{C}$ and $+4^{\circ}\text{C}$ of the mean temperature).

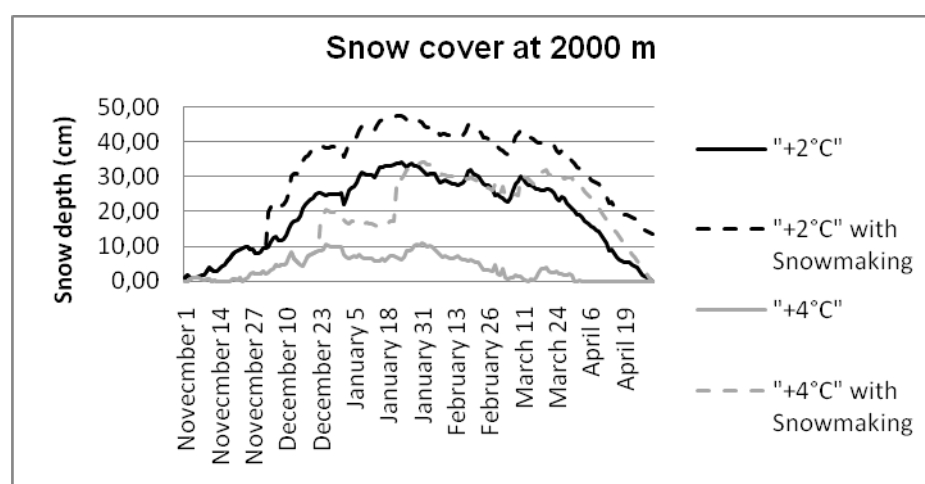


Figure 3

Thus, the ski area layer is shifting over the simulation between open or closed state according to the snow cover projections and showing if the ski resort is available or not for the skiers. Figure 4 shows the conceptual map with the main components of the model.

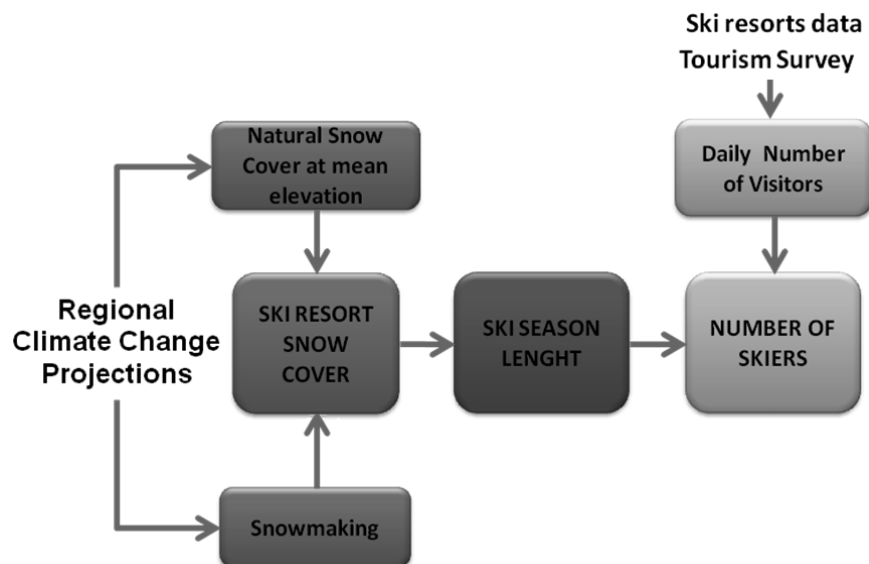


Figure 4. Conceptual map of the model

2.3 ENTITIES AND ATTRIBUTES

An entity is a distinct or separate object or actor that behaves as a unit in the ABM and may interact with other entities or be affected by the environment. The current state of the object is characterized by attributes. An attribute is a variable that distinguishes an entity from other entities of the same type or category, or traces how the entity changes over time (Grimm et al., 2006; 2010). In this model there are two main entities: the skiers and the ski resorts. Skiers include the following attributes:

- border of entrance to Andorra,

- visitor type (whether they are one-day visitors or overnight visitors), length of the stay,
- mean expenditure,
- destination ski resort, , and
- their current location coordinates for each time step.

All these attributes except the location are randomly assigned based on the real values and shares of these features obtained from the 2009 and 2010 national tourism survey (Andorra Turisme, 2009; 2010). The location coordinates attribute is updated throughout the simulation according to where the skier is each time step. Ski resorts have the following attributes:

- ski season length,
- state (whether it is open or closed),
- location coordinates, and
- mean elevation.

The location coordinates and mean elevation are based on the geographical features of each ski resort. The ski season length and the status of the resorts will change throughout the simulation according to the projected snow cover at the mean elevation of the ski resort described above.

2.4 TEMPORAL SCALE AND EXTENT

Each time step in the model represents 1 day and simulations run for 151 days, from December 1st to April 30th, a whole standard winter season in Andorra.

2.5 PROCESS OVERVIEWING AND SCHEDULING

This section defines the actions of each entity, in what order and when the different state variables are updated. Figure 5 shows the main flowchart of the model actions during a simulation. The model starts simulating the snow cover and setting the ski season starting day, ending day and length at each ski resort according to both the selected climate scenario (present, +2°C or +4°C) and if the snowmaking module is activated. Once these variables have been computed the model can set the state of the different ski resorts as open or closed for each day of the simulation. After that, a defined number of agents are created in order to simulate the daily arrival of skiers. The value of the daily number of arrivals will be different each month representing the real seasonality due to peak and holiday periods such Christmas and Easter. The changes in the daily rate have been set from the monthly statistics of tourist arrivals from the national tourism survey (Andorra Turisme, 2009, 2010). Once these agents have been created, they each follow the sequence described in figure 6 to set the attributes value and perform the decision-making response in the model according to agent and landscape attributes. When the agent enters the simulation, it is randomly assigned a border of entry and a visitor type based on the real statistical share of the feature. For instance, according to the tourism surveys (Andorra Turisme, 2009; 2010) the 73 % of the agents will be randomly assigned as one-day visitors and the remaining as overnight visitors. If the assigned type is overnight visitor, the attribute length of stay is set to an average value of 3 days and 1 day if one-day visitors. In order to estimate the daily and total expenditure of the skiers and simulating the difference of the mean expenditure in each type of visitor, the model assigns a value of 173 € for

overnight visitors and 110 € for one-day visitors. In the same way, based on the attendance statistics, the agent is randomly assigned to one of the different ski resorts. As the type of visitors, all these parameters have been set with the statistical values obtained from the national tourism survey of Andorra (Andorra Turisme, 2009; 2010).

Once the model has created the daily number of agents and assigned a value to their attributes, the agent checks if the assigned ski resort is open or closed. If it is open, the agent moves to the ski resort, otherwise it leaves the simulation. When all the agents have performed the decision making process the model computes the daily number of skiers at each ski resort and their total expenditure during the day. Finally the agents update their length of stay decreasing one day the value of this attribute. The agents with a new value of "0", that is those that were one-day visitors or in the last day of their stay, leave the simulation. In order to simulate a standard winter season, the described process is repeated 151 times, representing each day from December 1st to April 30th.

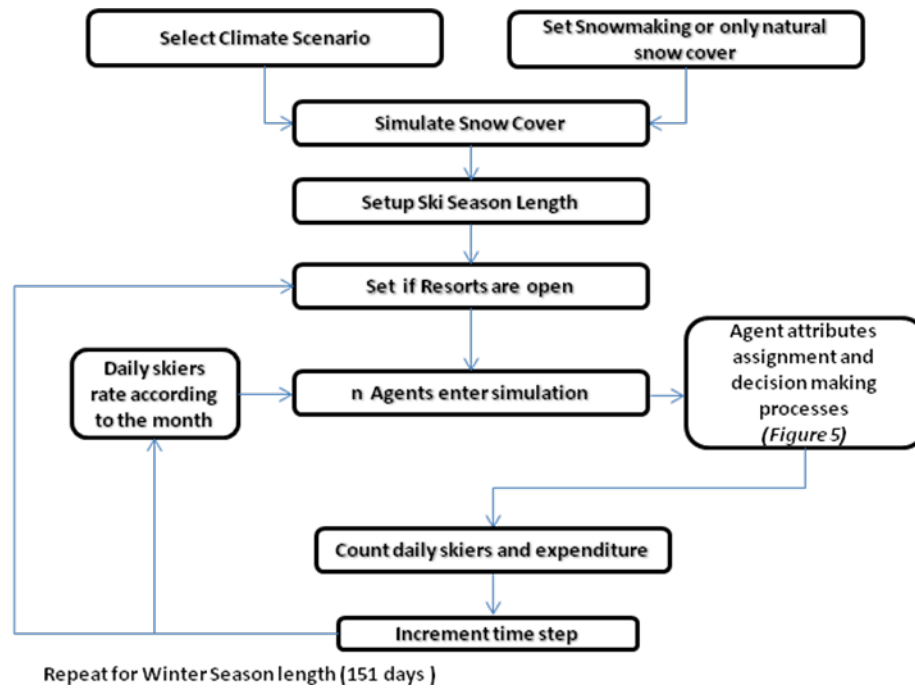


Figure 5. Model processes flowchart

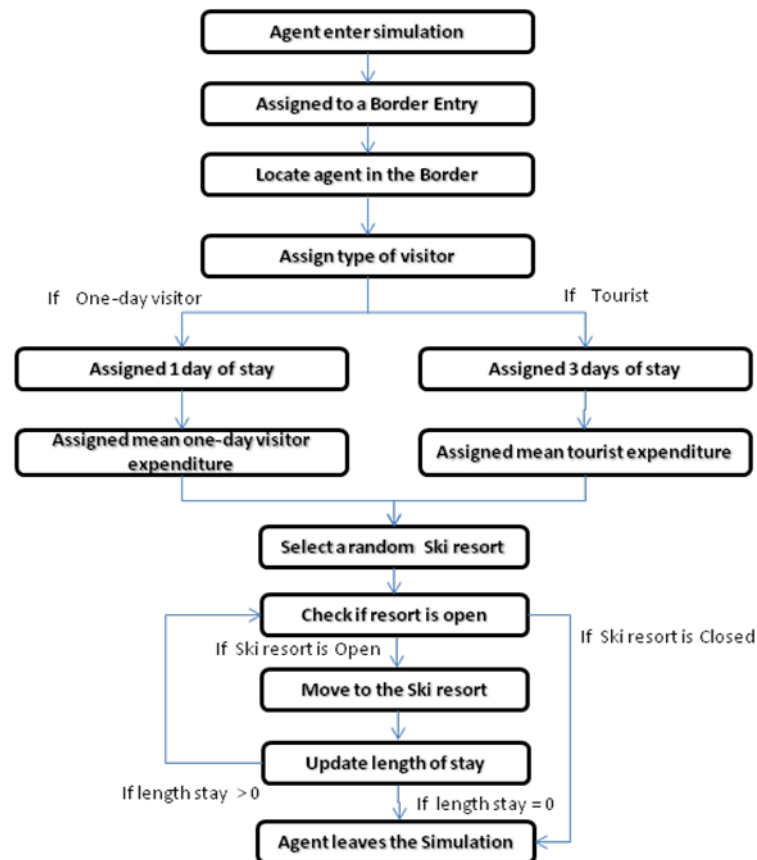


Figure 6. Agents decision-making and attribute assignment flowchart.

2. RESULTS

Four different scenarios have been run in order to analyze the future impact of climate change-induced snow reductions on the Andorra ski industry. The two first scenarios assume an increase of the mean temperature of +2°C and +4°C respectively. The other two scenarios add the effect of the potential artificial snowmaking on enhancing the natural snow cover and extending the season in the +2°C and +4°C base scenarios. The resulting season length and drop of skiers in the three ski resorts of Andorra (Grandvalira, Arcalís and Pal Arinsal) have been compared with the values of a reference period. The reference season length has been estimated as the average from 2000 to 2010 seasons and the reference attendance of skiers as the average of 2009 and 2010 seasons (Andorra Turisme 2009).

IMPACT ON SKI SEASON LENGTH

During the reference season, the three ski resorts had an average season length between 139 and 146 days (Table 1). In the +2°C scenario only the ski resort of Pal Arinsal, with most of its ski area at a lower elevation, around 2000 m, is affected by a 17% reduction of the season length, mainly at end of the season when snowfall is more erratic. The other two resorts, with most of their ski area located at higher elevations (above 2200 m), are not affected by this particular climate change scenario. On the other hand, it is noticed that the season reduction in Pal Arinsal would be four times higher without snowmaking (Table 1). In the +4°C scenario all three ski resorts would suffer serious reductions in their ski season length. The Pal Arinsal season would be

dramatically reduced in half, whereas the GrandValira and Arcalís would suffer small season reductions (8%) at the end of the season. In the same way as +2°C scenario, snowmaking would help to alleviate these reductions. However, because the worsening of the climate conditions required to produce artificial snow, the capacity of snowmaking to extend the season under the 4°C scenario is halved at Pal Arinsal. Applying the 100 day rule, all three ski resorts would remain reliable in the +2°C scenario, in the case of Pal Arinsal, largely thanks to snowmaking. In the 4°C scenario Pal Arinsal would not be reliable even with snowmaking, whereas the other two resorts would remain reliable thanks to snowmaking.

Table 1. Projected Changes in ski season length

Ski Resort	Reference average season (days)	% Change in the season length			
		Climate Scenario			
		+2 C		+4 C	
		No Snowmaking	With Snowmaking	No snowmaking	With Snowmaking
GrandValira	146	0%	0%	-33%	-8%
Arcalís	146	0%	0%	-33%	-8%
Pal-Arinsal	139	-67%	-17%	-100%	-54%

IMPACT ON THE NUMBER OF SKIERS AND THEIR EXPENDITURE

The use of an ABM model to simulate the interactions between the environment (snow cover) and the skiers makes it possible to connect the season length reductions at each ski resort with the drop of visitors at the regional scale in Andorra, and the related impact on expenditure in the country during a winter season. Table 2 shows the drop of the total number of skiers in Andorra under the different scenarios presented in the previous section. In the +2°C scenario, a small drop of the number of skiers and their expenditure is

noticed because only the lowest ski resort is affected on the first and last week of the season. On the other hand, the +4°C scenario indicates a more severe drop (-20%) that would lead to a loss of skier-related revenue of approximately 50 M€ (value 2009) per season. In this case, the two ski resorts with more attendance (Pal Arinsal and Grandvalira) would be affected both at the beginning at the end of the season rising the extent of the impacts. Finally, if snowmaking was not taken into account in the analyses, the impact of the loss of skiers and their expenditure would be much higher, -14% and -50% for the +2°C and +4°C scenarios respectively.

Table 2. Projected Changes in the total number of skiers

	No Snowmaking	With Snowmaking
+2°C	-14%	-1%
+4°C	-50%	-20%

5. DISCUSSION AND CONCLUSSIONS

The objective of the present study was to develop a first approach to understand the climate change vulnerability of the Pyrenean winter tourism industry, by means of a georeferenced ABM and taking Andorra ski resorts as the first case study. The findings of the study are congruent with previous literature analyzing the climate change impacts on the ski industry in other regions across the world. The reduction on the ski season length and the drop of the number of skiers has been projected especially on the lowest elevation ski resort in the region. Snowpack in the south-oriented central and eastern areas of the Pyrenees will be the most strongly affected by climate change (López-Moreno 2009) turning Andorra ski resorts into a potentially vulnerable

area despite their high location (most of the ski area is above 2000 m) in relation to other affected ski areas in Europe. On the other hand, snowmaking has a significant impact on extending and providing reliable season lengths in low elevation areas with a mid-range climate change scenario and in high elevation areas both with a mid and high-range climate change scenario. Due to the projected increase of the minimum temperature, in addition to the related environmental impacts of snow making, such as high levels of water use, the worsening of the suitable winter temperature conditions required to efficiently produce snow will become a future constraint. Therefore, snowmaking can not completely solve the problem of ensuring snow cover at low elevation ski resorts and should be considered as a suitable short-term strategy, but not as a sustainable long term adaptation strategy.

The ABM methodology used in this study is a very promising tool to simulate the climate change impacts on the winter tourism and particularly to analyze the interaction between physical changes, such as reductions in snow cover and the socio-economical implications, such as national GDP. One of the most challenging issues in this kind of analysis is relating the projected physical impacts in ski areas to socio-economical indicators, such as the shifts in skiers attendance or ski resorts revenues because the snow cover alteration (Dawson, 2009). One of the main reasons we chose to use a georeferenced ABM was precisely to achieve a more detailed assessment of the socio-economical dimension. The approach demonstrated here has potential to create and understand the linkage between the social and physical impacts relating the changes in the snowpack and resulting season length to the potential loss of skiers and their subsequent expenditure in the region. Compared to most of the

models published to date, this methodology can include the heterogeneity of the skiers both in the profile characteristics and the behavioral response to environmental changes. This is a very important issue to take into account in this type of study. First, because individuals can easily change their skiing behavior as a result of changing snow conditions in comparison to the expense and difficulty to implement structural and management adaptation strategies in the ski resorts supply side (Dawson et al. 2011). Secondly, in tourism modeling, visitors can not be grouped as a single aggregated class with the same unique features. Tourists always perform different features and behavioral responses that should be included in the analysis to capture a more realistic understanding of the macro-level phenomena such as the impacts on a regional scale.

Moreover, the use of a georeferenced landscape makes possible to capture the intrinsic spatial features of tourism phenomena. The agent movement through space and the influence of geographical parameters such as travel distances or specificities of the tourism destinations landscape such as ski resorts location and elevation can be analyzed with this approach.

In this context, future developments of the model will seek to improve the detail of the heterogeneity of skier profile (i.e., ski level or activity involvement) the skier behavioral response to snow conditions as well as the effects of the season reduction. We are planning to extend the model to other ski resorts in French and Spanish parts of the Pyrenees. This will make possible to include in the analysis the effects at a regional scale of a potential activity and spatial substitution of the skiers as well as other behavioral responses identified in previous studies (König, 1998; Behringer et al., 2000; Fukushima et al., 2002;

Hamilton et al., 2007; Unbehau et al., 2008; Dawson et al., 2009; Shih et al., 2009 Dawson, 2011).

Finally, as a first prototype model, it is pertinent to note that the projected results should be taken as future general trends and not as accurate predictions for the Andorra ski resorts. This first model is intended to be used in a participatory process as a Planning Support tool involving and assisted by different stakeholders such as climate scientists, ski resorts managers and local planners and administrators. The tool is thought to involve the different actors in a joint and transdisciplinary exercise of co-redesign and refine the model (Geertman and Stillwell, 2004; Batty, 2004; Vonk et al., 2007; Barnaud et al. 2008). Thus, it is expected that the value and the accuracy of the model outcome could be improved by redefining the variables and parameters with the expertise of the stakeholders. Snow cover projections, the snowmaking module and the potential skier behavioral response are the main points to discuss and redesign during this process. In this way, it is expected that not only the resulting model but also the reflection and design process could help the different stakeholders in understanding the vulnerability and the potential impacts as well as the in decision-making process of designing and developing appropriate sustainable adaptation strategies to future climate change.

6. BIBLIOGRAPHY

Abegg B (1996) Klimaänderung und Tourismus. Klimafolgenforschung am Beispiel des Wintertourismus in den Schweizer Alpen. vdf Zurich, Zurich

Abegg B, Agrawala S, Crick F, de Montfalcon A (2007) Climate change impacts and adaptation in winter tourism. In: Climate change in the European Alps: adapting winter tourism and natural hazards management. Paris: Organization for Economic Co-operation and Development.

ACACIA (2000). Tourism and recreation. In: Parry M (ed) Assessment of potential effects and adaptations for climate change in Europe. Jackson Environment Institute, University of East Anglia, Norwich.

Andorra Turisme (2009). National Survey. Andorran Government

Andorra Turisme (2010). National Survey. Andorran Government

Axtell, R. L., Epstein, J. M., Dean, J. S., Gumerman, G. J., Swedlund, A. C., Harburger, J., Chakravarty, S., Hammond, R., Parker, J., and Parker, M. (2002) Population Growth and Collapse in a Multi-Agent Model of the Kayenta Anasazi in Long House Valley. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 99(3): 7275-7279.

Barthel, R., S. Janisch, N. Schwarz, A. Trifkovic, D. Nickel, C. Schulz, and W. Mauser. 2008. An integrated modelling framework for simulating regional-scale actor responses to global change in the water domain. *Environmental Modelling and Software* 23: 1095-1121.

Barnaud C, Bousquet F, Trebuil G, 2008, "Multi-agent simulations to explore rules for rural credit in a highland farming community of Northern Thailand" *Ecological Economics* 66 615-627

Batty M, (2004). Dissecting the streams of planning history: technology versus policy through models." *Environment and Planning B - Planning and Design* 31 326-330

Beniston, M. (2003). Climatic change in mountain regions: A review of possible impacts. *Climatic Change*, pages 5-31.

Behringer, J., Buerki, R., & Fuhrer, J. (2000). Participatory integrated assessment of adaptation to climate change in alpine tourism and mountain agriculture. *Integrated Assessment*, 1(3), 331–338.

Bonabeau E, (2002). Agent-Based Modeling: Methods and Techniques for Simulating Human Systems" Proceedings of the National Academy of Sciences 99:7280-7287

Breiling M., Charamza P. (1999) The impact of global warming on winter tourism and skiing: a regionalized model for Austrian snow conditions. *Regional Environmental Change* 1(1): 4-14

CADS (2010). 2n Informe sobre el canvi climàtic a Catalunya. Consell Assessor per al Desenvolupament Sostenible. Generalitat de Catalunya.

Canada Country Study (1998) Impacts of climate change on recreation and tourism. In: *Responding to Global Climate Change — National Sectoral Issues*. Toronto: Environment Canada.

Dawson, J., & Scott, D. (2007). Climate change vulnerability in the Vermont ski tourism sector. *Annals of Leisure Research*, 10(3–4), 550–571.

Dawson, J. Scott, D., & McBoyle, G. (2009). Analogue analysis of climate change vulnerability in the US Northeast ski tourism. *Climate Research*, 39(1), 1–9.

Dawson, J., & Scott, D. (2010). Systems analysis of climate change vulnerability for the US Northeast ski sector. *Tourism Planning & Development*, 7(3), 219–235.

Dawson, J., Havitz, M., and Scott, D., (2011). Behavioral Adaptation of Alpine Skiers to Climate Change: Examining Activity Involvement and Place Loyalty', *Journal of Travel & Tourism Marketing*, 28: 4, 388-404

Elsasser H, Bürki R (2002) Climate change as a threat to tourism in the Alps. *Climate Research* 20: 253-257

Epstein, J.M. and Axtell, R., 1996 *Growing Artificial Societies: Social Science from the Bottom Up*. (The Brookings Institution, Washington, D.C.)

Fukushima T, Kureha M, Ozaki N et al (2003) Influences of air temperature change on leisure industries: case study on ski activities. *Mitigation and Strategies for Climate Change* 7: 173-189

Galloway R (1988) The potential impact of climate change on Australian ski fields. In: Pearman G (ed) *Greenhouse: planning for climatic change*. CSIRO, Melbourne

Geertman S, Stillwell J, 2004, "Planning support systems: an inventory of current practice" *Computers, Environment and Urban Systems* 28 291-310.

Gimblett, H. R., S. Cable, D. Cole & R. M. Itami. (2005). Recreation Visitation and Impacts in the Bighorn Crags Portion of the Frank Church – River of No

Return Wilderness. Pgs. 18 –21. In: Cole, David N. (compiler). Computer Simulation Modeling of Recreation Use: Current Status, Case Studies, and Future Directions. Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-143. Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. September 2005. Pgs 75.

Grimm, V., U. Berger, F. Bastiansen, S. Eliassen, V. Ginot, J. Giske, J. Goss-Custard, Grand, T., Heinz, S. K., and Huse, G.(2006). A standard protocol for describing individual-based and agent-based models. *Ecological Modelling* 198, no. 1-2: 115-126.

Hamilton L, Rohall D, Brown B et al (2003) Warming winters and New Hampshire's lost ski areas: an integrated case study. *International Journal of Sociology and Social Policy* 23(10): 52-73

Hamilton, L, Brown, C., & Keim, B. D. (2007). Ski areas, weather and climate: Time series models for New England case studies. *International Journal of Climatology*, 27, 2213–2124.

Hennessy K, Whetton P, Smith, I., Bathols, J., Hutchinson, M., and Sharples, J. (2003) The impact of climate change on snow conditions in mainland Australia. CSIRO Atmospheric Research, Aspendale, Australia

Heo, I., and Lee, S., (2008). The Impact of Climate Changes on Ski Industries in South Korea – In the case of the Yongpyong Ski resort. *Journal of the Korean geographical society*. 43 (5):715-727.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2007) Climate change 2007: synthesis report. Summary for policy makers. Fourth Assessment Report. United Nations Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva

Itami, R., R. Raulings, G. MacLaren, K. Hirst, R. Gimblett, D. Zanon, P. Chladek (2002). RBSim 2: Simulating the complex interactions between human movement and the outdoor recreation environment. In *Monitoring and Management of Visitor Flows in Recreational and Protected Areas Conference Proceedings*, A. Arnberger, C. Brandenburg, A. Muhar, editors. Institute for Landscape Architecture and Landscape Management University of Agricultural Sciences, Vienna, Austria, 30 Jan – 02 Feb 2002 pp 191-198.

Janssen, M. A. (2009). Understanding artificial anasazi. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 12.

Kohler, T. A., and G. J. Gumerman. (1999). *Dynamics in human and primate societies: Agent-based modeling of social and spatial processes*. New York: Oxford University Press.

König, U., (1998) Tourism in a warmer world: implications of climate change due to enhanced greenhouse effect for the ski industry in the Australian Alps. *Wirtschaftsgeographie und Raumplanung* 28 University of Zurich

König U, Abegg B (1997) Impacts of climate change on tourism in the Swiss Alps. *Journal of Sustainable Tourism* 5(1): 46-58

Lamothe and Périard Consultants (1988) Implications of climate change for downhill skiing in Québec. *Climate Change Digest* 88-03. Environment Canada, Ottawa

Lipski S, McBoyle G (1991) The impact of global warming on downhill skiing in Michigan. *East Lakes Geographer* 26: 37-51

López-Moreno JI, Goyette S, Beniston M (2009) Impact of climate change on snowpack in the Pyrenees: horizontal spatial variability and vertical gradients. *J Hydrol* 374: 384–396

Manson, S. M. and Evans, T. (2007). Agent-based modeling of deforestation in southern yucatán, mexico, and reforestation in the midwest united states. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104(52):20678-20683.

McBoyle G, Wall G (1987). The impact of CO₂ induced warming on downhill skiing in the Laurentians. *Cahiers de géographie du Québec* 31(82): 39-50

McBoyle G, Wall G (1992) Great Lakes skiing and climate change. In: Gill A, Hartmann R (eds) *Mountain resort development*. Centre for Tourism Policy and Research, Simon Fraser University, Burnaby, British Columbia, Canada

Moen, J. and Fredman, P. (2007) Effects of Climate Change on Alpine Skiing in Sweden. *JPurnal of Sustainalbe Tourism*, 15 (4):418-437

Parker, D. C., T. Berger, S. Manson, and W. J. McConnell. 2001. *Agent- Based Models of Land-Use and Land-Cover Change*. LUCC Report Series No. 6, Volume 1. [http://www.globallandproject.org/ Documents/LUCC_No_6.pdf](http://www.globallandproject.org/Documents/LUCC_No_6.pdf).

Parker, D.C., S. M. Manson, M. A. Janssen, M. J. Hoffmann, and P. Deadman. 2003. Multi-agent systems for the simulation of land-use and land-cover change: a review. *Annals of the Association of American Geographers* 93, no. 2: 314-337.

Scott, D., Dawson, J., & Jones, B. (2008). Climate change vulnerability of the US Northeast winter recreation—Tourism sector. *Mitigation Adaptation Strategies for Global Change*, 13, 577–596.

Railsback, S.F., 2001. Concepts from complex adaptive systems as a framework for individual-based modelling. *Ecol. Model.* 139, 47–62.

Scott, D., & McBoyle, G. (2007). Climate change adaptation in the ski industry. *Mitigation and Adaptation Strategies to Global Change*, 12(8), 1411–1431.

Scott, D., McBoyle, G., & Mills, B. (2003). Climate change and the skiing industry in southern Ontario (Canada): Exploring the importance of snowmaking as a technical adaptation. *Climate Research*, 23, 171–181.

- Scott, D, McBoyle, G., Mills, B., & Minogue, A. (2006). Climate change and sustainability of ski-based tourism in eastern North America: A reassessment. *Journal of Sustainable Tourism*, 14(4), 376–398.
- Scott, D., McBoyle, G., & Minogue, A. (2007). The implications of climate change for the Québec ski industry. *Global Environmental Change*, 1, 181–190.
- Shih, C., Nicholls, S., & Holecek, D. F. (2009). Impact of weather on downhill ski lift ticket sales. *Journal of Travel Research*, 47(3), 359–372.
- Smajgl, A., Brown, D. G., Valbuena, d., and Huigen, M. G. A. (2011) Empirical characterisation agent behaviours in socio-ecological systems. *Environmental Modelling and Software* 26:837-844
- Steiger R, Mayer M (2008) Snowmaking and climate change. Future options for snow production in Tyrolean ski resorts. *Mt Res Dev* 28:292–298
- Steiger, R. (2010): The impact of climate change on ski season length and snowmaking requirements in Tyrol, Austria. *Climate Research*, 43(3), p. 251-262.
- Unbehaun, W., Probstl, U., & Haider, W. (2008). Trends in winter sports tourism: Challenges for the future. *Tourism Review*, 63(1), 36–47.
- Vonk G, Geertman S, Schot P, (2005). Bottlenecks blocking widespread usage of planning support systems" *Environment and Planning A* 37 909-924
- Werner, B. T., and D. E. McNamara. 2007. Dynamics of coupled human landscape systems. *Geomorphology* 91, no. 3-4: 393-407.
- World Tourism Organization (2003) Climate change and tourism. Proceedings of the First International Conference on Climate Change and Tourism. Djerba, 9-11 April 2003
- Yang, J. and Wan C., (2010). Progress in Research on the Impacts of Global Climate Change on Winter Ski Tourism. *Advances in climate change research* 1(2):55-62.
- Zellner M L, 2008, "Embracing Complexity and Uncertainty: The Potential of Agent-Based Modeling for Environmental Planning and Policy" *Planning Theory & Practice* 9 437-457