3 NEOBIOTA – MODELIRANJE RASTLINSKIH VRST

Andrej KOBLER
Gozdarski inštitut Slovenije

3.1 Uvod

Namen presečnega področja B5 (Modeliranje kot orodje za nadzor ITV), oziroma njegovega dela namenjenega rastlinskim vrstam, je bil pripraviti kvantitativni model ene od razširjenih tujerodnih rastlinskih vrst v Sloveniji, ki imajo močan potencial širjenja. Ta model smo želeli uporabiti za napovedovanje možnega širjenja vrste v prihodnjih desetletjih pod vplivom spremenjenih naravnih okoliščin. Poleg tega smo želeli omenjeni model in karte prikazati kot zgled za obravnavo drugih tujerodnih invazivnih rastlinskih vrst.

Odločili smo se za drevesno vrsto *Robinia pseudacacia*, ki je po zastopanosti v slovenskih gozdovih že postala ena od pomembnih drevesnih vrst, saj predstavlja 0,58 % celotne lesne zaloge slovenskih gozdov. Spričo že dolgo uveljavljene rabe robinijevega lesa v vinogradniških pokrajinah ter spreminjajočih se naravnih pogojev (globalno klimatsko ogrevanje) je mogoče pričakovati širjenje robinije tudi v prihodnje. Za robinijo pri Zavodu za gozdove obstaja kvalitetna baza podatkov o geografski razširjenosti in lesnih zalogah, kar nam je dalo kvalitetno osnovo za empirično modeliranje ekološke niše te drevesne vrste in s tem za napovedovanje možnih scenarijev širjenja vrste.

Na geografsko razširjenost vrste in na njeno širjenje vplivajo tako naravni okoljski faktorji kot tudi posredni in neposredni človekovi vplivi. V empirični model je z določeno mero točnosti možno zajeti tako naravne kot človeške vplive. Če pa model želimo uporabljati za napovedovanje prihodnje razširjenosti vrste, je vanj smiselno zajeti le tiste vplivne faktorje, ki jih je mogoče napovedovati z dovolj veliko točnostjo in podrobnostjo. To je možno za naravne vplivne faktorje, precej težje ali skoraj nemogoče pa za človeške vplivne faktorje, še posebej za bolj oddaljene časovne horizonte. Tako na primer obstajajo geografsko eksplicitne napovedi klimatskih sprememb za Slovenijo do konca stoletja, nemogoče pa je za tako obdobje napovedati na primer vplive skupne evropske kmetijske politike ali pa na primer spremenjenih vzorcev rabe tal do konca stoletja. Zato smo se odločili, da v model zajamemo le osnovne značilnosti gozdnega rastišča (tla, relief, klima), ostalo pa zanemarimo. Tako zasnovan model lahko odraža le najpomembnejše značilnosti ekološke niše vrste in s tem omogoči napovedi potenciala za rast. Za določeno točko v prostoru torej lahko napovemo, kako primerna bo za rast robinije.

Model zanemarja številne druge naravne in človekove vplive na širjenje areala vrste (možnost in hitrost širjenja semen, konkurenca drugih rastlinskih vrst, naravne sukcesijske procese, pojave bolezni in škodljivcev, gozdne požare, spremenjeno rabo tal, zakonodajni okvir in podobno), zato je treba njegove napovedi razumeti zgolj kot dodatno informacijo, ki naj odločevalcem zožuje območje negotovosti. Zaradi zanemarjanja vpliva rabe tal v modelu pa z njim tudi ni mogoče napovedovati širjenja ali oženja areala izven sedanjih meja gozda, iz česar sledi, da podajamo napovedi le ob predpostavki nespremenljivih sedanjih meja gozda.

Od v model vključenih osnovnih značilnosti gozdnega rastišča (tla, relief, klima) prvi dve do konca stoletja privzamemo kot konstantni (v času, ne pa v prostoru), klima pa se spreminja. Človek v zadnjih 200 letih s svojimi aktivnostmi usodno posega v podnebje in vpliva na procese podnebnih sprememb.

Podnebni scenariji za naslednja desetletja napovedujejo segrevanje podnebja, ki bo na severu Evrope izrazitejše v zimskem času, na jugu in osrednjem delu Evrope pa v poletnem času. V južnem delu napovedujejo tudi zmanjšanje količine padavin (IPCC 2001, 2007). Ocene globalnega segrevanja v Četrtem ocenjevalnem poročilu Medvladnega foruma o podnebnih spremembah (IPCC 2007) se gibljejo med 1,8 °C in 4 °C do leta 2100 v primerjavi z vrednostmi iz leta 1990. Posledice podnebnih sprememb so tudi pri nas že precejšnje in izmerljive (Bergant 2007, Kajfež-Bogataj & al. 2003). Slovenija se je v zadnjih 50 letih ogrela za več kot 1 °C, kar je hitreje od svetovnega in evropskega povprečja. Opazno je upadanje količine padavin v prvi polovici leta in naraščanje v drugi polovici. Temperature zraka naj bi se v obdobju od leta 2001 do 2030 povečale za 0,5 do 2,5 stopinje Celzija, od leta 2031 do 2060 za 1 do 3,5 stopinje Celzija in v obdobju od leta 2061 do 2090 1,5 do 6,5 stopinj Celzija (Bergant 2003, 2007). Količina padavin poleti se bi lahko zmanjšala za do 20 odstotkov (Kajfež-Bogataj & al. 2008).

Z napovedovanjem prostorskih sprememb (premikov) gozdov zaradi vplivov podnebnih sprememb so se intenzivno ukvarjali tako v evropskem prostoru (npr. Kienast 1991, Brzeziecki & al. 1993, 1995, Kienast & al. 1994) kot tudi pri nas (Kutnar & Kobler 2011). Študije so pokazale, da se bo razporeditev različnih tipov gozdov značilno spreminjala s spreminjanjem parametrov podnebja, da bi lahko prišlo do zmanjšanja nekaterih gospodarsko, ekološko in naravovarstveno pomembnih gozdov (npr. jelovo-bukovi gozdovi) na račun povečanje deleža gospodarsko manj zanimivih in hkrati požarno bolj ogroženih gozdov (npr. termofilni gozdovi).

3.2 Metoda

Simulacije prihodnje možne porazdelitve robinije temeljijo na (1) empiričnem modelu, ki za vsak z gozdom pokrit kilometrski kvadrant v Sloveniji napoveduje višino lesne zaloge robinije (kar je tudi ciljna spremenljivka modela, ki odraža primernost rastišča za robinijo) ter na (2) scenarijih možnih podnebnih sprememb v prihodnosti. Hektarska lesna zaloga robinije je izračunana kot povprečje znotraj kvadranta velikega en krat en kilometer, kar je tudi ločljivost modela. Temeljni podatek za izračun povprečne lesne zaloge robinije v kvadrantu je bila sestojna karta Zavoda za gozdove.

Uporabili smo tri skupine pojasnjevalnih spremenljivk (podnebje, tla, relief), s katerimi model pojasnjuje vrednosti ciljne spremenljivke:

1. Podnebne spremenljivke prikazujejo mesečna in letna povprečja temperatur, padavin in evapotranspiracije za 30-letno obdobje med 1971 in 2000 (ARSO 2005, 2006a, 2006b) ozoroma njihove napovedi do leta 2100 (Bergant 2003, 2007).
2. Podatke o tleh smo pridobili iz pedološke karte 1:25000 Centra za pedologijo in varstvo okolja na Biotehniški fakulteti Univerze v Ljubljani. Upoštevali smo tip tal po klasifikaciji FAO, znotraj posameznega kvadranta smo privzeli večinski talni tip.
3. Podatke o reliefu (naklon, nadmorska višina in smer naklona) smo pridobili iz digitalnega modela reliefa z ločljivostjo 100 m Geodetske uprave RS. Za naklon in nadmorsko višino smo privzeli povprečje kvadranta. Smer naklona smo reklasificirali v devet razredov (za osem glavnih smeri neba ter za raven relief) in znotraj kvadranta privzeli večinski razred. Poleg tega smo v modelu upoštevali tudi heterogenost reliefa, ki smo jo definirali kot število razredov smeri naklona znotraj kvadranta.

Klimatske napovedi so podane v obliki intervalnih vrednosti za posamezno podnebno spremenljivko. Iz podanih intervalnih napovedi temperatur, padavin in evapotranspiracije smo oblikovali tri scenarije klimatskih sprememb: srednji scenarij (srednja temperatura T, srednje padavine R, srednja evapotranspiracija E), pesimistični scenarij (maksimalni T, minimalni R, maksimalni E) in optimistični scenarij (minimalni T, maksimalni R, minimalni E).

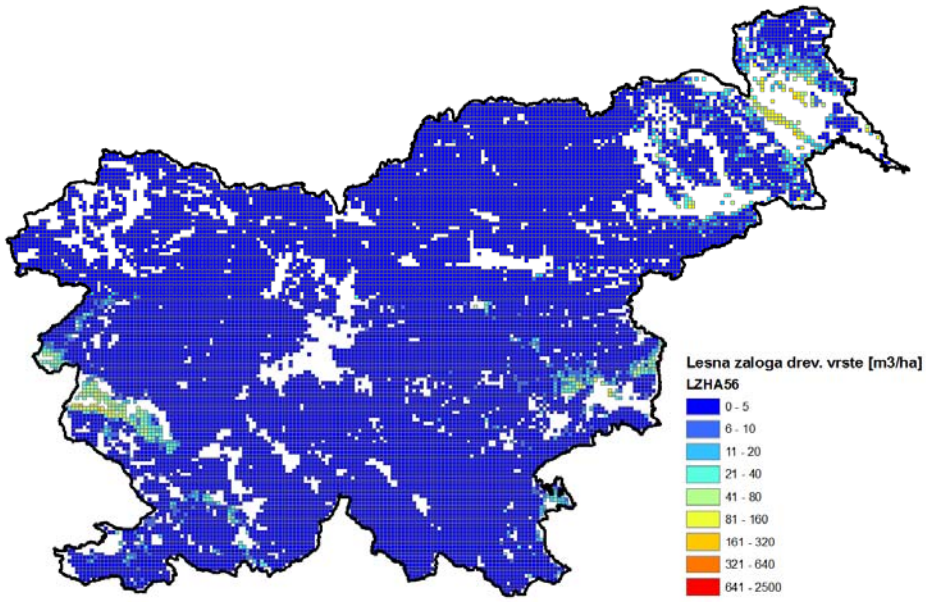
Empirični model v obliki ansambla regresijskih dreves imenovanega *random forest* (Breiman 2001) je bil zgrajen iz učnih podatkov z metodo Top-Down Induction of Decision Trees (TDIDT) z orodjem CLUS (Kocev 2011; Kocev & al. 2007; Struyf & Džeroski, 2006; Blockeel & Struyf 2002). Algoritem TDIDT se začne z izbiro testa za korensko vozlišče (angl. root node). Glede na izid testa se učna množica razdeli na podmnožice. V primeru binarnih dreves se razdeli v dve podmnožici: ena vsebuje zapise, za katere je test uspel, druga pa zapise, za katere test ni uspel. Ta postopek se med konstrukcijo drevesa rekurzivno ponavlja. Deljenje se ustavi, ko je zadovoljen ustavitveni kriterij (na primer število zapisov v podmnožicah pade pod določen prag; dolžina poti od korena do tekoče podmnožice preseže nek prag in podobno). Točnost modela smo ocenili z 10-kratnim prečnim preverjanjem veljavnosti (cross-validation).

Napovedi prihodnjega stanja smo po modelu izračunali z upoštevanjem treh podnebnih scenarijev. Simulacije prihodnjega stanja smo primerjali z modelnim današnjim stanjem (izračunanim z modelom iz danes veljavnih podnebnih vrednosti), ne z dejanskim. Tako razlika med modelnim današnjim in prihodnjim stanjem ne vključuje napak modela. Za vsako skupino ciljnih spremenljivk (delež vegetacijskih tipov ter višina lesne zaloge glavnih drevesnih vrst) smo izračunali agregatno razliko med današnjim in napovedanim prihodnjim stanjem po metodi evklidskih razdalj in rezultate prikazali v obliki kart.

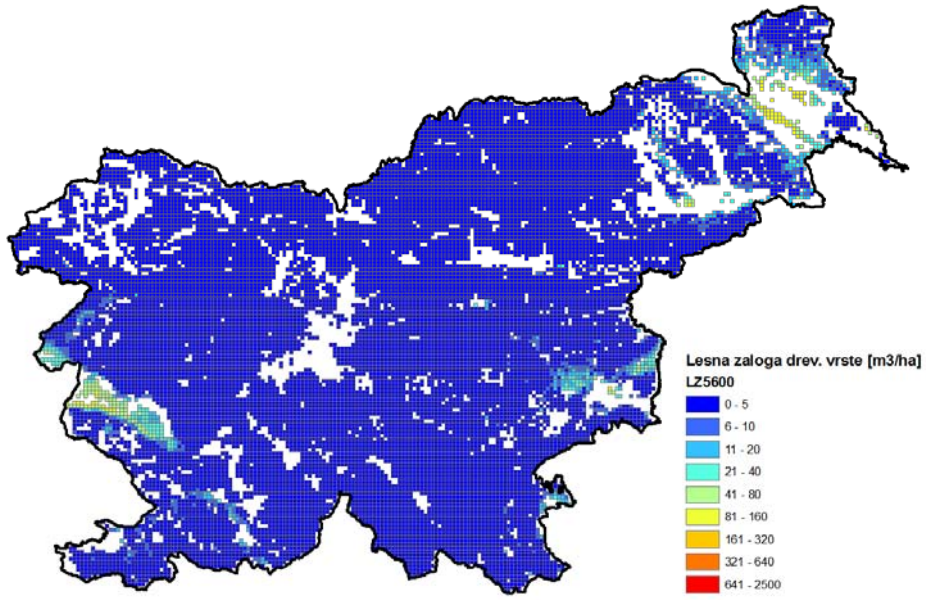
3.3 Rezultati

Kot mero točnosti modela smo izračunali korelacijo dejanske lesne zaloge robinije leta 2000 in modelnega stanja lesne zaloge za leto 2000. Korelacija med obema znaša 0,83.

3.3.1 Stanje leta 2000

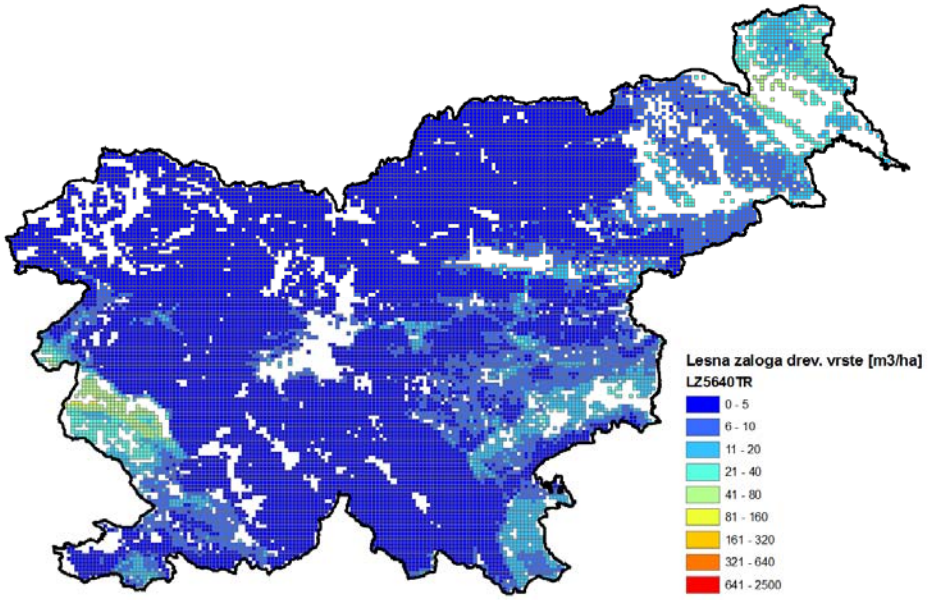


Slika 1: Dejansko stanje (povzeto po ZGS)

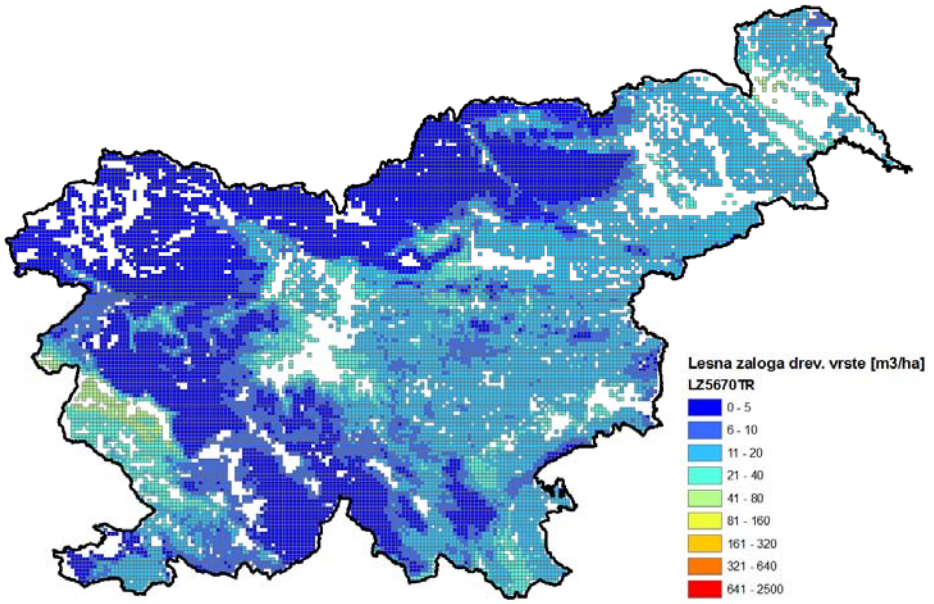


Slika 2: Modelno stanje (osnova za primerjave z napovedmi)

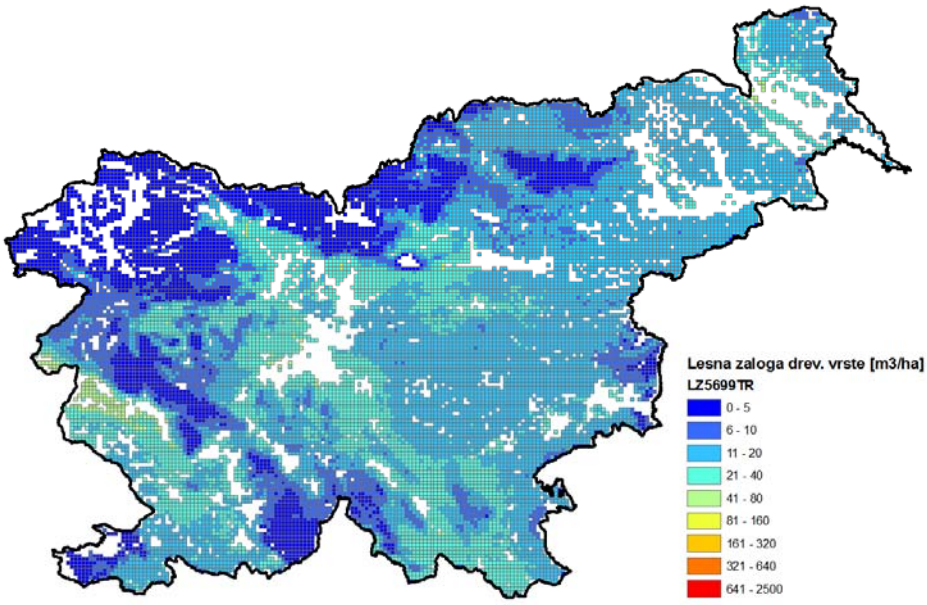
3.3.2 Napovedi po srednjem scenariju



Slika 3: Napoved po srednjem scenariju za leto 2040.

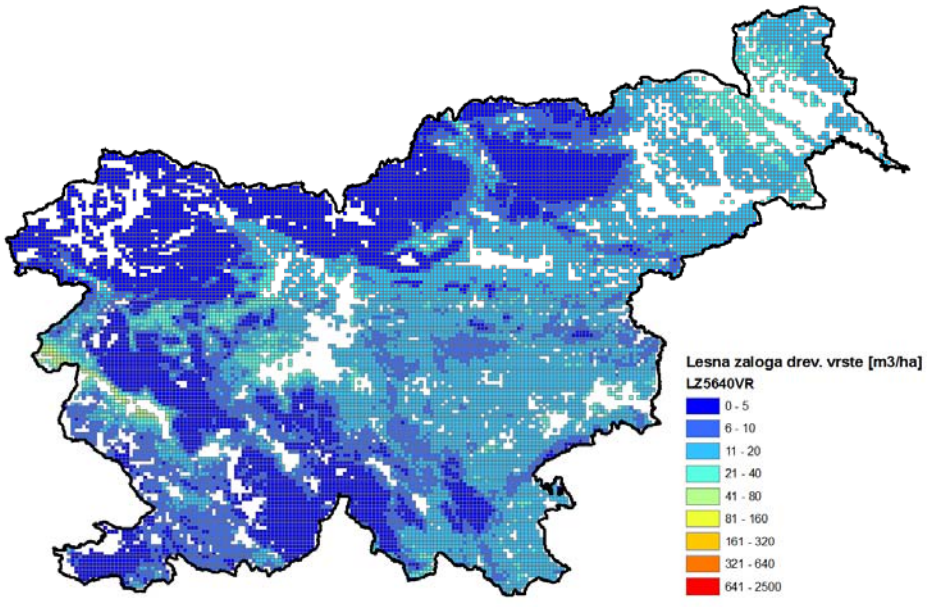


Slika 4: Napoved po srednjem scenariju za leto 2070.

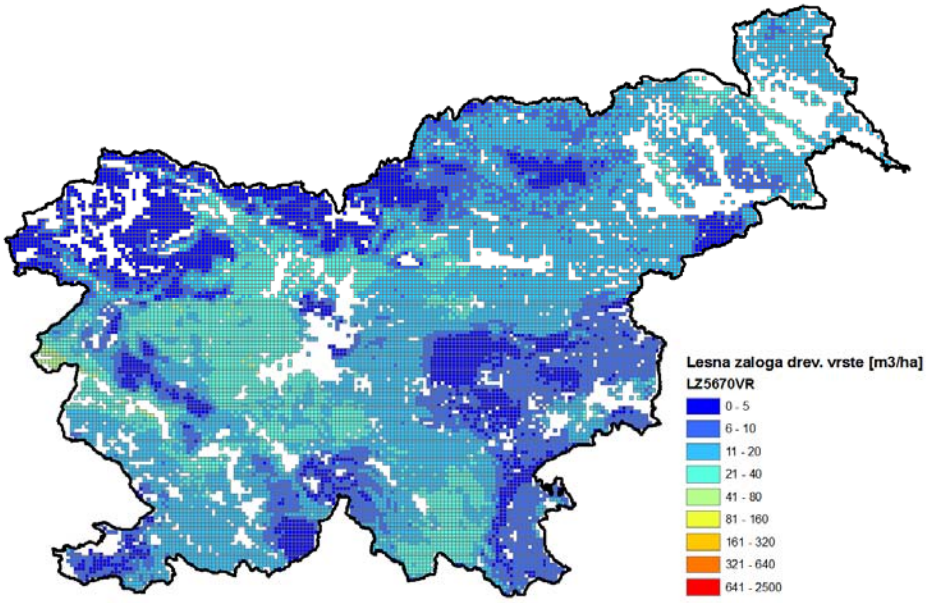


Slika 5: Napoved po srednjem scenariju za leto 2100.

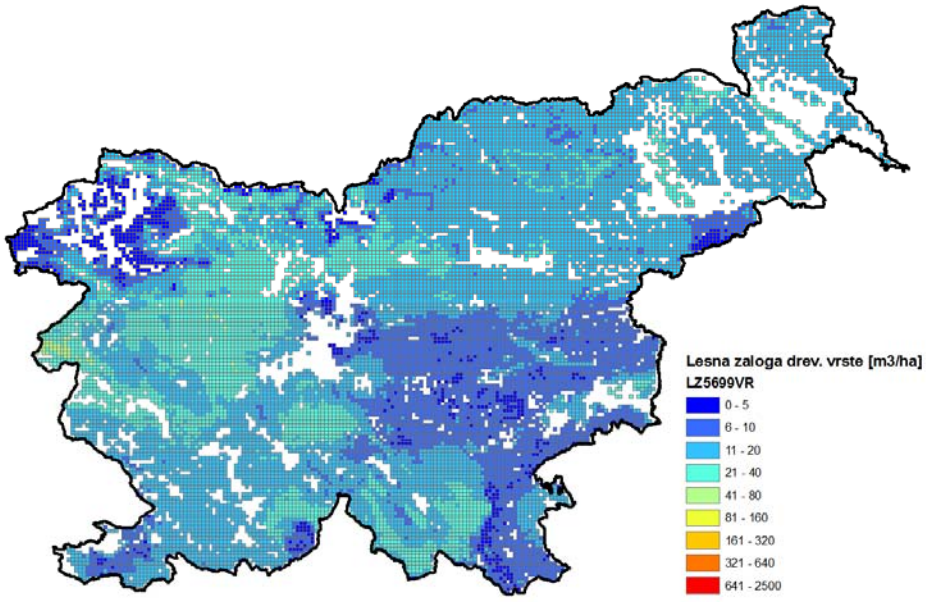
3.3.3 Napovedi po pesimističnem scenariju



Slika 6: Napoved po pesimističnem scenariju za leto 2040.

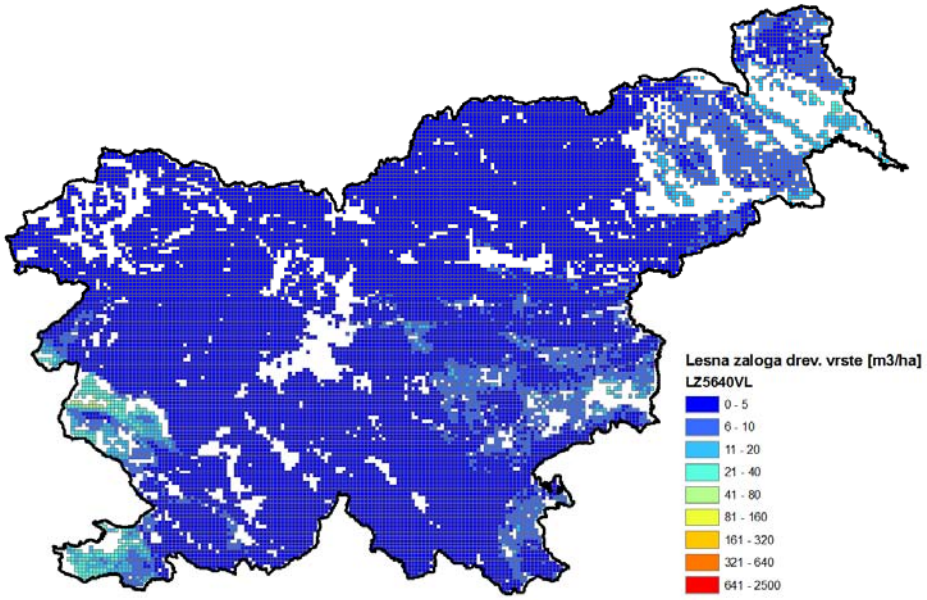


Slika 7: Napoved po pesimističnem scenariju za leto 2070.

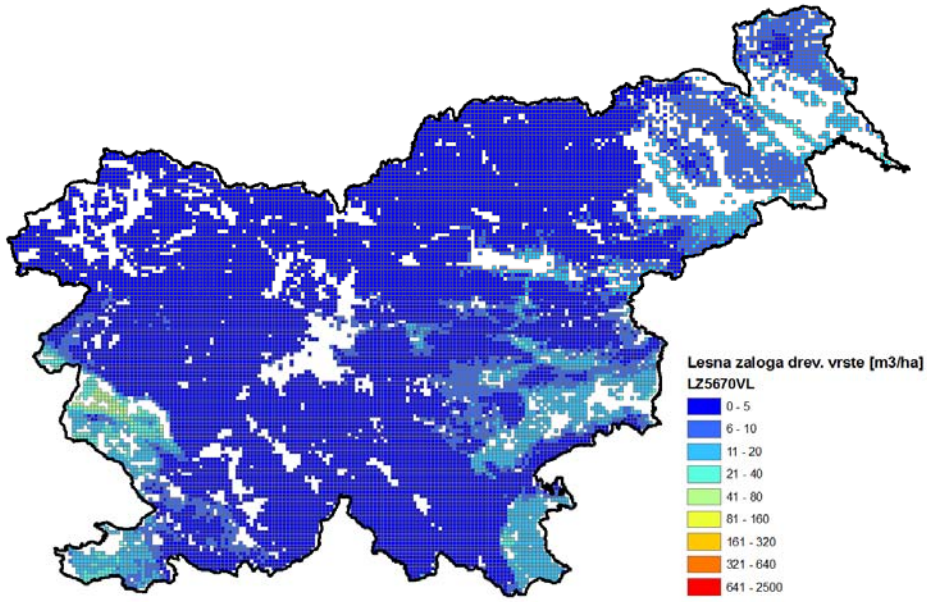


Slika 8: Napoved po pesimističnem scenariju za leto 2100.

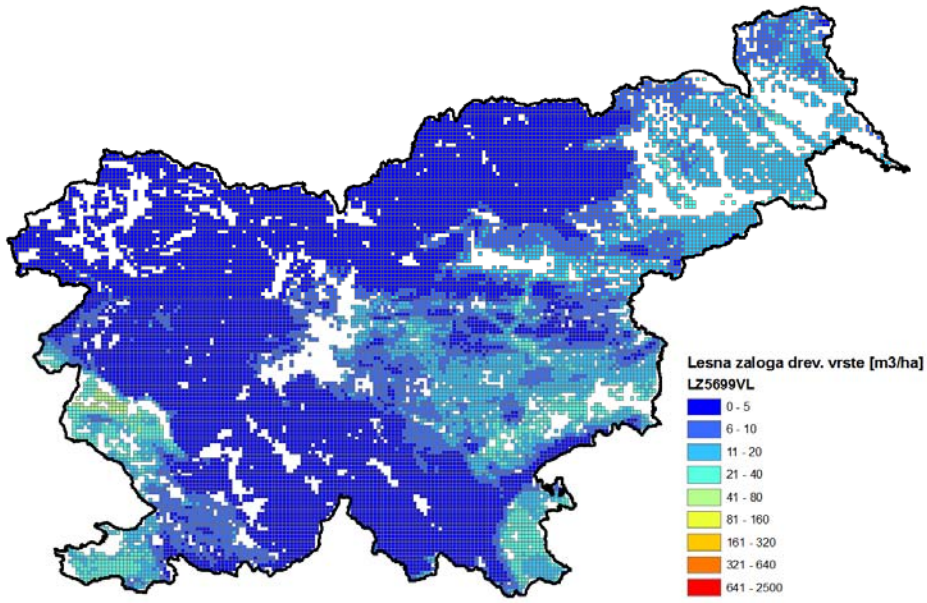
3.3.4 Napovedi po optimističnem scenariju



Slika 9: Napoved po optimističnem scenariju za leto 2040.



Slika 10: Napoved po optimističnem scenariju za leto 2070



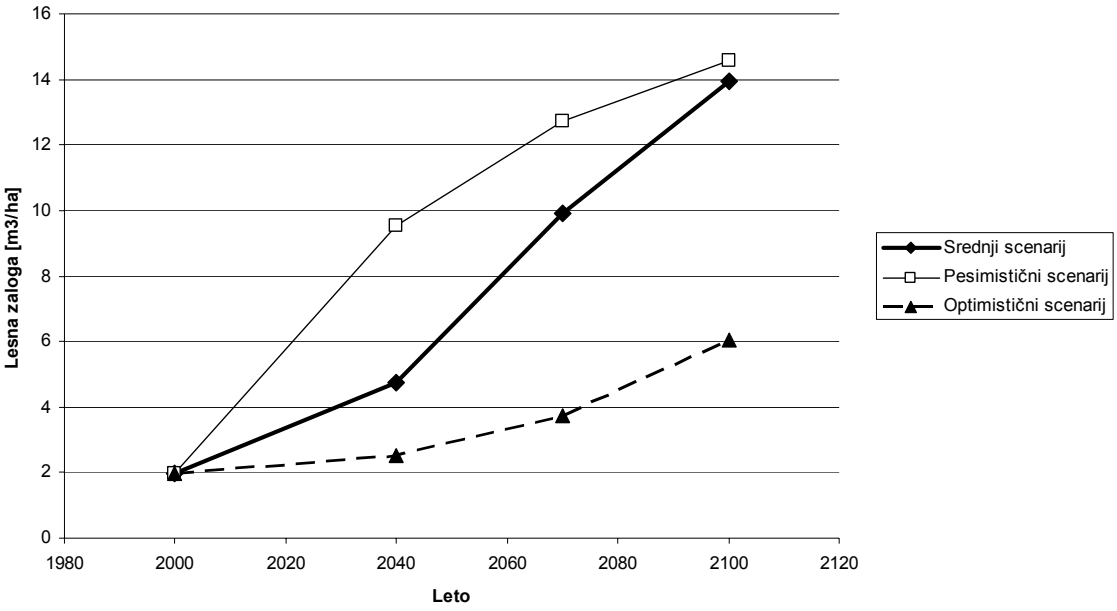
Slika 11: Napoved po optimističnem scenariju za leto 2100

3.3.5 Kvantitativni povzetek kart na ravni države

Tabela 1 in Slika 12 prikazujeta naše modelne napovedi povečevanja lesne zaloge robinije glede na tri prikazane scenarije klimatskih sprememb. Tudi po optimističnem scenariju se bi lahko količina robinije v Sloveniji do leta 2100 povečala za več kot 200%. Po pesimističnem scenariju bi se količina robinije lahko povečala tudi za 640%.

Tabela 1: Modelna napoved povečevanja povprečne hektarske lesne zaloge robinije v Sloveniji od leta 2000 do leta 2100 zaradi klimatskega segrevanja.

Obdobje, scenarij klimatskih sprememb	**Povprečna hektarska lesna zaloga robinije v Sloveniji [m^3/ha]**	**Indeks lesne zaloge glede na leto 2000**
Dejansko stanje leta 2000	1.98	1.0
Modelno stanje leta 2000	1.98	1.0
Srednji scenarij, leta 2040	4.73	2.4
Srednji scenarij, leta 2070	9.92	5.0
Srednji scenarij, leta 2100	13.95	7.0
Pesimistični scenarij, leto 2040	9.55	4.8
Pesimistični scenarij, leto 2070	12.71	6.4
Pesimistični scenarij, leto 2100	14.57	7.4
Optimistični scenarij, leto 2040	2.52	1.3
Optimistični scenarij, leto 2070	3.72	1.9
Optimistični scenarij, leto 2100	6.05	3.1



Slika 12: Modelna napoved povečevanja povprečne hektarske lesne zaloge robinije v Sloveniji od leta 2000 do leta 2100 zaradi klimatskega segrevanja.

3.4 Diskusija

Na osnovi uporabljenih podnebnih scenarijev, ki vsi predvidevajo manjše ali večje segrevanje podnebja ob različnem padavinskem režimu, napovedi nakazujejo splošen trend širjenja območij, primernih za rast robinije. Kot jasno kažejo gornje kartne napovedi, rast lesne zaloge robinije izhaja ne le iz večjega deleža robinije v njenem sedanjem arealu, pač pa predvsem iz njene geografske širitve iz Primorske in Prekmurja v osrednjo Slovenijo. Po pesimističnem scenariju bi robinija lahko postala sestavni del gozdov v vseh nižinskih delih Slovenije, kar bi imelo velik vpliv na gospodarjenje z gozdovi. Robinija je invazivna tuja drevesna vrsta, ki je zelo konkurenčna v primerjavi z domačimi drevesnimi vrstami in v določenih območjih (npr. GGO Murska Sobota, Kraško GGO) že ovira normalno gospodarjenje z gozdom.

Opozorilo: vse modelne napovedi v tej raziskavi temeljijo na empiričnih podatkih sedanje geografske razširjenosti robinije ter nekaterih poenostavitev in predpostavk, ki nam jih nalaga omejena razpoložljivost podatkov, objektivna nezmožnost zanesljivega napovedovanja ključnih antropogenih vplivov ter naše omejeno poznavanje ekološke niše robinije. Na geografsko razširjenost vrste in na njeno širjenje vplivajo tako naravni okoljski faktorji kot tudi posredni in neposredni človekovi vplivi. V empirični model je z določeno mero točnosti možno zajeti tako naravne kot človeške vplive. Če pa model želimo uporabljati za napovedovanje prihodnje razširjenosti vrste, je vanj smiselno zajeti le tiste vplivne faktorje, ki jih je mogoče napovedovati z dovolj veliko točnostjo in podrobnostjo. To je možno za naravne vplivne faktorje, precej težje ali skoraj nemogoče pa za človeške vplivne faktorje, še posebej za bolj oddaljene časovne horizonte. Tako na primer obstajajo geografsko eksplicitne napovedi klimatskih sprememb za Slovenijo do konca stoletja, nemogoče pa je za tako obdobje napovedati na primer vplive skupne evropske kmetijske politike ali pa na primer spremenjenih vzorcev rabe tal do konca stoletja. Zato smo v model zajeli le osnovne značilnosti gozdnega rastišča

(tla, relief, klima), ostalo pa zanemarili. Tako zasnovan model lahko odraža le najpomembnejše značilnosti ekološke niše vrste in s tem omogoči napovedi potenciala za rast. Za določeno točko v prostoru torej lahko napovemo, kako primerna bo za rast robinije. Model zanemarja številne druge naravne in človekove vplive na širjenje areala vrste (možnost in hitrost širjenja semen, konkurenca drugih rastlinskih vrst, naravne sukcesijske procese, pojave bolezni in škodljivcev, gozdne požare, spremenjeno rabo tal, zakonodajni okvir in podobno), zato je treba njegove napovedi razumeti zgolj kot dodatno informacijo, ki naj odločevalcem zožuje območje negotovosti. Zaradi zanemarjanja vpliva rabe tal v modelu pa z njim tudi ni mogoče napovedovati širjenje ali oženje areala izven sedanjih meja gozda, iz česar sledi, da vse podajamo napovedi le ob predpostavki nespremenljivih sedanjih meja gozda.

3.5 Viri

ARSO (Agencija RS za okolje) (2005): *Podnebne karte povprečnih mesečnih in letnih temperatur 1971−2000*.

ARSO (Agencija RS za okolje) (2006a): *Podnebne karte povprečnih mesečnih in letnih padavin 1971−2000*.

ARSO (Agencija RS za okolje) (2006b): *Podnebne karte povprečnih mesečnih in letnih evapotranspiracij 1971−2000*.

Bergant K. (2003): *Projekcije simulacij globalne klime na lokalni nivo in njihova uporaba v agrometeorologiji*. Doktorska disertacija, Biotehniška fakulteta, Univerza v Ljubljani.

Bergant K. (2007): Projekcije podnebnih sprememb za Slovenijo. V: Jurc M. (ur.): *Podnebne spremembe – Vpliv na gozd in gozdarstvo*. Biotehniška fakulteta, Oddelek za gozdarstvo in obnovljive vire, Ljubljana, Strokovna in znanstvena dela 130: 67−86.

Blockeel H., Struyf J. (2002): Efficient algorithms for decision tree cross-validation. *Journal of Machine Learning Research* 3: 621-650.

Breiman L. (2001): Random forests. *Machine Learning* 45(1): 5-32.

Brzeziecki B., Kienast F., Wildi O. (1993): A simulated map of the potential natural forest vegetation in Switzerland. *Journal of Vegetation Science* 4: 499−508.

Brzeziecki B., Kienast F., Wildi O. (1995): Modelling potential impacts of climate change on the spatial distribution of zonal forest communities in Switzerland. *Journal of Vegetation Science* 6: 257−268.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2001): Climate Change 2001: impacts, adaptation and vulnerability. V: McCarthy J. J., Canziani O. F., Leary N. A., Dokken D. J., White K. S. (ur.): *Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the IPCC*. Cambridge, UK, Cambridge University Press.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2007): Climate Change 2007: impacts, adaptation and vulnerability. V: Parry M. L., Canziani O. F., Palutikof, J. P., Van Der Linden P. J., Hanson C. E. (ur.): *Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the IPCC*, Cambridge, UK, Cambridge University Press.

Kajfež-Bogataj L., Sušnik A., Črepinšek Z., Bergant K., Kurnik B., Matajc I., Rogelj D., Cegnar T., Žust A., Dolinar M., Pečenko A., Gregorič G. (2003): *Ranljivost slovenskega kmetijstva in gozdarstva na podnebno spremenljivost in ocena predvidenega vpliva*. Agencija Republike Slovenije za okolje, 146.

Kienast F. (1991): Simulated effects of increasing atmospheric CO2 and changing climate on the successional characteristics of Alpine forest ecosystems. *Landscape Ecology* 5: 225−238.

Kienast F., Brzeziecki B., Wildi O. (1994): Computergestützte Simulation der räumlichen Verbreitung naturnaher Waldgesellschaften in der Schweiz. Schweiz. *Zeitschrift für Forstwesen* 145: 293−309.

Kocev D. (2011): *Ensembles for predicting structured outputs*. Doctoral dissertation, Jožef Stefan International Postgraduate School Ljubljana, Slovenia.

Kocev D., Vens C., Struyf J., Dzeroski S. (2007): *Ensembles of multi-objective decision trees*. In ECML '07: Proceedings of the 18th European Conference on Machine Learning, LNCS 4701, pages 624-631. Springer, Berlin-Heidelberg.

Kutnar L., Kobler A., Krajnc N., Simončič P. (2011): *Prilagajanje gospodarjenja z gozdovi podnebnim spremembam glede na pričakovane spremembe značilnosti in prostorske razporeditve gozdov* : zaključno

poročilo o rezultatih opravljenega raziskovalnega projekta v okviru Ciljnega raziskovalnega programa (CRP) "Konkurenčnost Slovenije 2006-2013". Ljubljana: Gozdarski inštitut Slovenije p: 30, 39, 31, 25.

Struyf J., Džeroski S. (2006): *Constraint based induction of multi-objective regression trees*. V: Proc. of the 4th International Workshop on Knowledge Discovery in Inductive Databases KDID, LNCS 3933, 222-233. Springer.