

# Ilmastonmuutoksen todennäköisyysennusteet – muuttuvatko tulokset, kun otetaan avuksi alueelliset ilmastomallit?

Jouni Räisänen  
Helsingin yliopiston fysiikan laitos  
17.8.2009

## Tiivistelmä

Esitimme aiemmin ACCLIM-hankkeen verkkosivulla maailmanlaajuisten ilmastomallien tulosten perusteella laadittuja todennäköisyysennusteita lämpötilan ja sademäärän muutoksille Suomessa vuosina 2011-2020 (Ruokolainen ja Räisänen 2007a). Nyt ennusteita on päivitetty ottamalla huomioon myös EU:n ENSEMBLES-hankkeen alueelliset ilmastomallisimulatiot. Alueellisten mallien vaikutus ennusteisiin osoittautuu kuitenkin pieneksi – saatavat todennäköisyysjakaumat eivät juuri eroa niistä, jotka saatiin suoraan maailmanlaajuisten ilmastomallien tulosten perusteella.

Sopeutumistutkimusten tarpeita ajatellen on siis käytännössä sama, arvioidaanko lämpötilan ja sademäärän muutokset maailmanlaajuisista ilmastomalleista vai otetaanko mukaan myös alueellisten ilmastomallien antamaa tietoa. Joitakin muita asioita tarkasteltaessa (esim. erilaiset sään ääri-ilmiöt) alueellisten mallien antama lisäarvo voi luonnollisesti olla suurempi.

## 1. Johdanto

Tärkein työkalu tulevia ilmastonmuutoksia arvioitaessa ovat koko maapallon kattavat ilmastomallit. Koska tuulet ja merivirrat eivät tunne leveys- tai pituuspiirirajoja, vain maailmanlaajuisissa mallissa voidaan ottaa huomioon kaikki ilmasto-oloihin vaikuttavat asiat. Maailmanlaajuisten mallien hilaväli on kuitenkin pakko pitää melko karkeana – mallista riippuen se on noin 100-400 km – jotta malliajot saataisiin tehtyä järjellisessä ajassa.

Maailmanlaajuisten mallien lisäksi on kehitetty alueellisia ilmastomalleja. Näiden mallien erotuskyky on paljon tarkempi: esimerkiksi EU:n 6. puiteohjelman ENSEMBLES-hankkeessa alueellisia malleja on ajettu 25 km:n hilavälillä. Näin pystytään kuvaamaan tarkemmin maantieteellisten olosuhteiden vaihtelu, Pohjois-Euroopan alueella esimerkiksi Köli-vuoriston ja Itämeren vaikutus. Näin tarkan hilavälin mallia pystytään ajamaan nykyisillä tietokoneilla vain melko pienellä alueella (n. 5000 km). Tieto tämän alueen ulkopuolisista tapahtumista välitetään alueelliselle mallille jonkin maailmanlaajuisen ilmastomallin antamien *reunaehtojen* avulla. Käytännössä näiden reunaehtojen valinta vaikuttaa simuloituihin ilmastonmuutoksiin vähintään yhtä paljon kuin alueellinen malli itse.

Ruokolainen ja Räisänen (2007a) esittivät CMIP3-hankkeen (Meehl ym. 2007) maailmanlaajuisiin ilmastomallisimulaatioihin perustuvia todennäköisyysennusteita lämpötilan ja sademäärän muutoksille Suomessa perusjakson 1971-2000 ja vuosikymmenen 2011-2020 välillä. Tässä esityksessä kerrotaan, miten ennusteet muuttuvat, kun maailmanlaajuisten CMIP3-simulaatioiden tuloksiin yhdistetään ENSEMBLES-hankkeen alueellisten simulaatioiden tulokset. Perusajatus laskentamenetelmässä on seuraava:

1. ”Suuren mittakaavan” ilmastonmuutoksille lasketaan todennäköisyysjakauma suoraan maailmanlaajuisten ilmastomallien tulosten perusteella. Tässä käytetään hyväksi uudelleenotantamenetelmää (Räisänen ja Ruokolainen 2006, Ruokolainen ja Räisänen 2007b), joka ottaa huomioon sekä ilmastomallien väliset erot että ilmaston luonnolliseen vaihteluun liittyvän epävarmuuden.
2. Alueellisten ilmastomallien avulla arvioidaan paikallisen ilmastonmuutoksen todennäköisyysjakauma ”suuren mittakaavan” ilmastonmuutoksen funktiona.
3. Kohtien 1 ja 2 tulokset yhdistetään.

Teknisesti olisi mahdollista arvioida paikallisten ilmastonmuutosten todennäköisyysjakauma myös yksinomaan alueellisten ilmastomallien tuloksia käyttäen. Tämä tuskin kuitenkaan olisi viisasta, sillä toisistaan riippumattomia alueellisia ilmastomallisimulaatioita on käytettävissä paljon vähemmän kuin maailmanlaajuisia mallisimulaatioita. Tässä työssä oli käytössä 22 maailmanlaajuista ilmastomallia. Alueellisia ilmastomallisimulaatioita oli käytössä 13, mutta monet niistä olivat lähisukulaisia keskenään eli saman maailmanlaajuisen ilmastomallin reunaehtoihin perustuvia. Kaikkiaan käytössä olleet 13 ENSEMBLES-simulaatiota saivat reunaehdonsa vain kuudelta eri maailmanlaajuiselta mallilta.

Laskentamenetelmää selostetaan hiukan tarkemmin tämän dokumentin lopussa olevassa liitteessä ja perusteellisesti verkkojulkaisussa Räisänen ja Ruokolainen (2009). Seuraavassa luvussa keskitytään tuloksiin: miten alueellisten ilmastomalliajajojen hyväksikäyttö muuttaa ennusteita ilmaston muuttumisesta?

## 2. Tuloksia

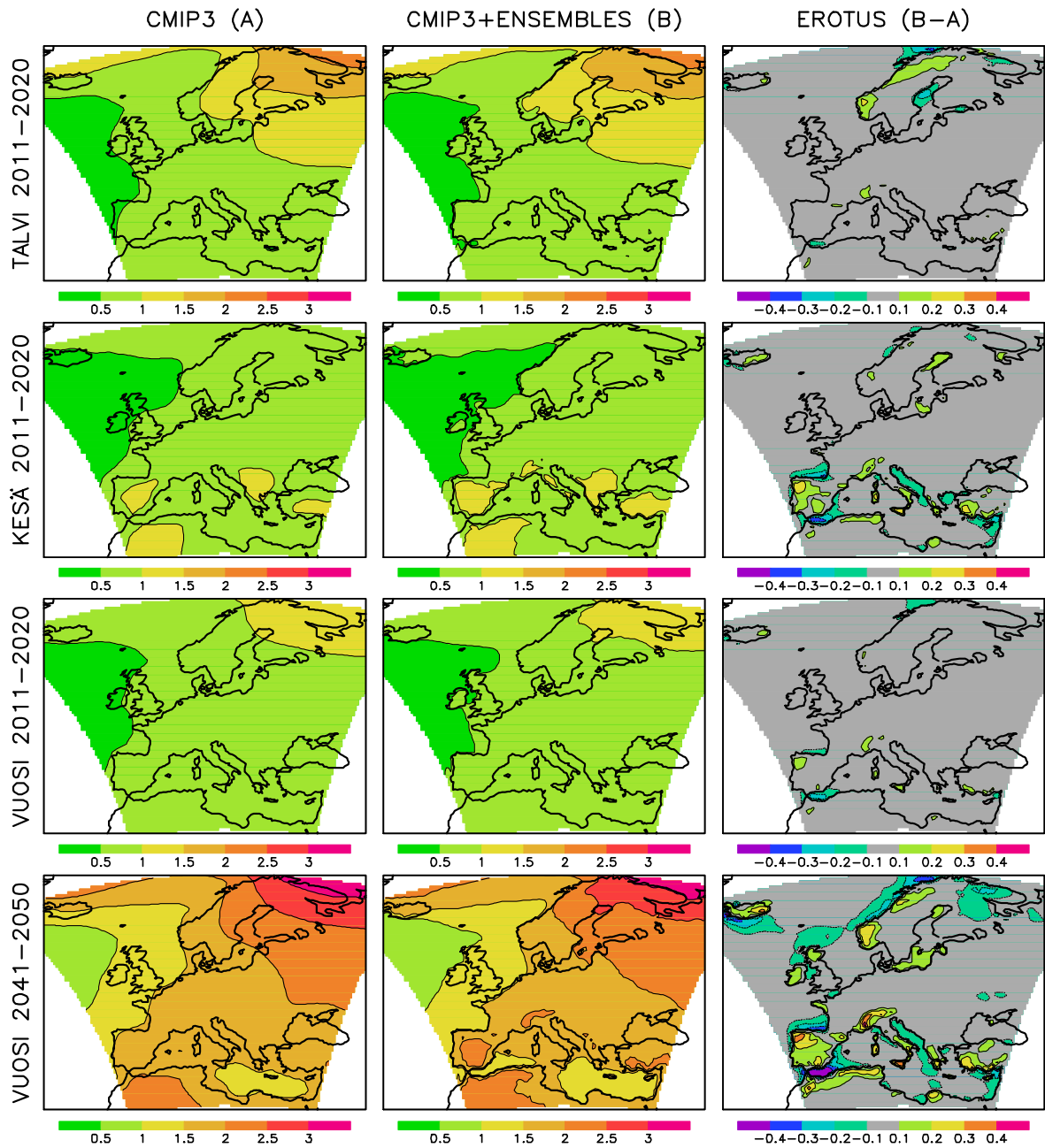
Tarkastellaan aluksi parhaita arvioita lämpötilan ja sademäärän muutoksista. Nämä parhaat arviot voidaan määrittellä joko lasketun todennäköisyysjakauman mediaanina tai sen keskiarvona. Kuviiin 1 ja 2 on valittu keskiarvo.

Kuvan 1 kolmella ensimmäisellä rivillä on esitetty keskimääräiset lämpötilanmuutokset vuosien 1971-2000 ja 2011-2020 välillä talvelle (joulu-helmikuu), kesälle (kesä-elokuu) ja koko vuodelle. Ensimmäinen sarake perustuu yksinomaan maailmanlaajuisten CMIP3-mallien tuloksiin, toisessa sarakkeessa on käytetty hyväksi myös ENSEMBLES-hankkeen alueellisten mallien tuloksia. Kolmannessa sarakkeessa on näiden kahden laskutavan erotus.

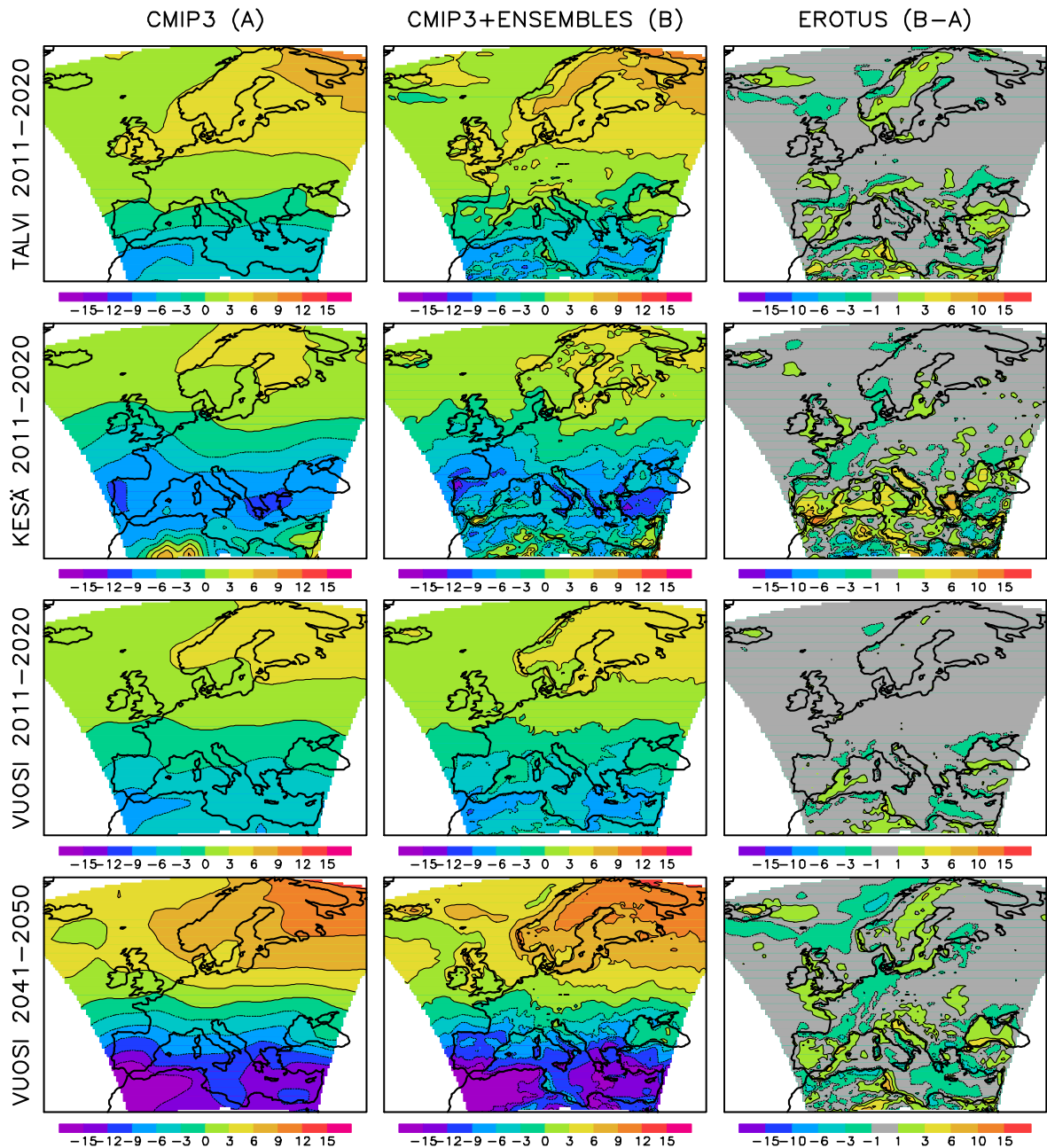
Heti nähdään, että kahden ensimmäisen sarakkeen kartat ovat hyvin samannäköisiä. Keskisarakkeessa lämpenemisen samanarvonkäyrät seuraavat kylläkin seuraavat rannikkoviivoja jonkin verran tarkemmin. Kuitenkin erot laskentamenetelmien välillä ovat enimmäkseen pienempiä kuin  $0.1^{\circ}\text{C}$ , poikkeuksena Välimeren alue kesällä.

Viimeisellä rivillä on samalla tavoin laskettu vuosikeskilämpötilan muutos vuosikymmenelle 2041-2050. Nyt lämpeneminen on kaiken kaikkiaan suurempaa, samoin myös absoluuttisessa mielessä erot laskentamenetelmien välillä. Esimerkiksi Suomen alueella erot ovat kuitenkin yhä lähestulkoon olemattomia.

Kuvassa 2 esitetään vastaavanlainen vertailu keskimääräisille sademäärän muutoksille. Johtopäätökset ovat jotakuinkin samat. Kun alueellisten mallien antama tieto otetaan mukaan, muuttuvat sademääränmuutoksen samanarvonkäyrät astetta röpelöisemmiksi. Erot laskentamenetelmien välillä ovat silti absoluuttisessa mielessä varsin pieniä, näin varsinkin Suomen alueella.

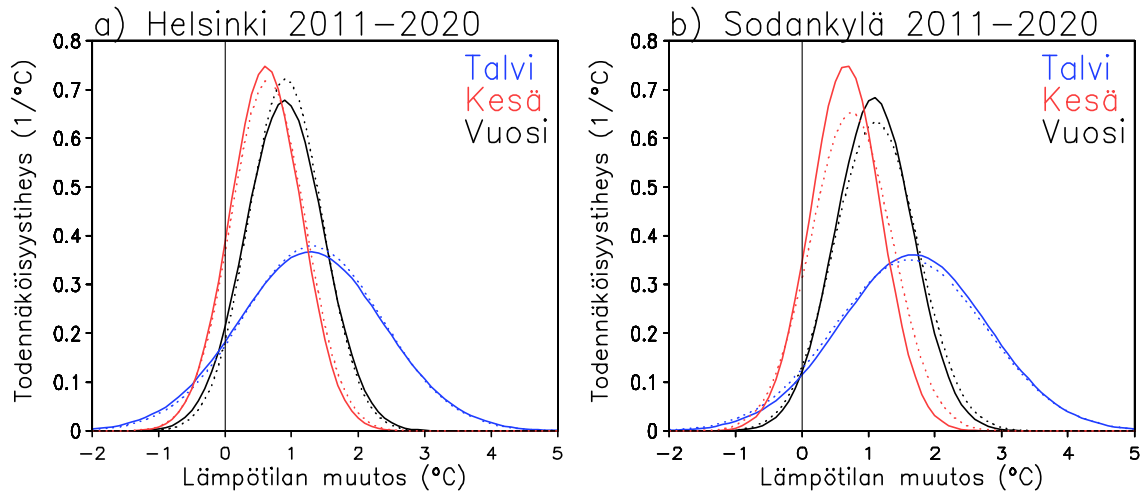


**Kuva 1.** Keskimääräinen lämpötilan muutos (°C) siirryttäessä jaksosta 1971-2000 jaksoihin 2011-2020 (kolme ensimmäistä riviä) ja jaksoon 2041-2050 (viimeinen rivi). Ensimmäinen sarake: yksinomaan maailmanlaajuisiin ilmastomalleihin perustuva laskelma; toinen sarake: maailmanlaajuisien ja alueellisten ilmastomallien tulokset yhdistävä laskelma. Kolmas sarake näyttää laskutapojen erotuksen eli alueellisten ilmastomallien vaikutuksen ennusteeseen.

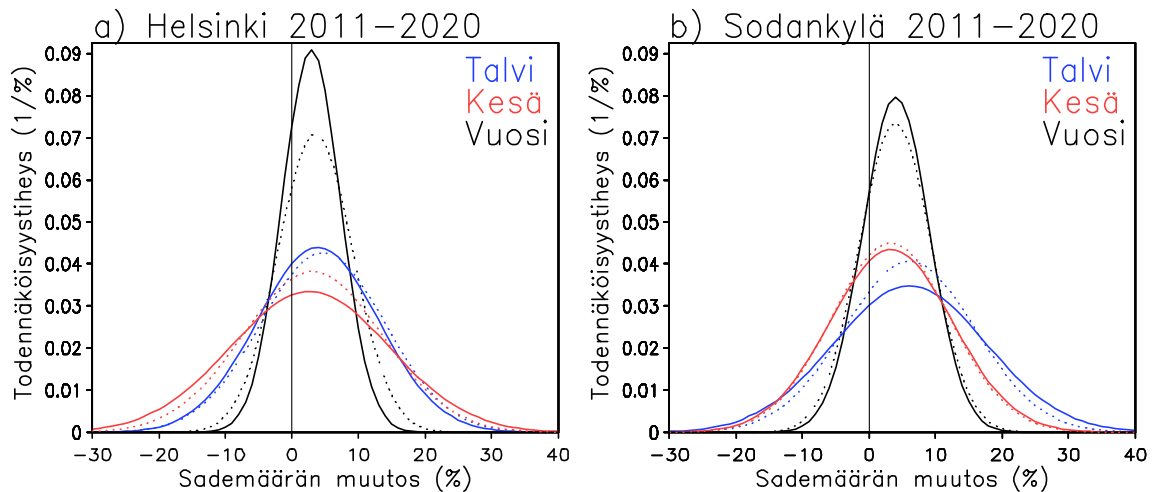


**Kuva 2.** Kuten kuva 1, mutta nyt tarkasteltavana on prosenttiyksiköissä ilmaistu sademäärän muutos.

Kuvissa 3 ja 4 vertaillaan kummankin menetelmän antamia todennäköisyyssennusteita kahdessa laskentapisteessä Suomessa: Helsingin seudulla etelässä (60.25°N, 24.75°E) ja Sodankylän kohdalla pohjoisessa (67.25°N, 26.75°E). Kuvassa laskettuihin todennäköisyyksiin on havainnollisuuden vuoksi sovitettu normaalijakaumat, vaikka laskentamenetelmä sinänsä voikin tuottaa lievästi normaalista poikkeavia jakaumia. Yhtenäisillä viivoilla merkityt jakaumat on saatu ottamalla huomioon sekä maailmanlaajuisten että alueellisten mallien tulokset. Pisteviivojen mukaiset jakaumat taas perustuvat kokonaan maailmanlaajuisiin malleihin.



**Kuva 3.** Normaalijakauman muodossa esitetyt todennäköisyysennusteet lämpötilan muutokselle (1971-2000 → 2011-2020) Helsingin ja Sodankylän seudulla. Yhtenäisellä viivalla merkityt jakaumat on saatu käyttämällä sekä maailmanlaajuisten että alueellisten mallien tuloksia. Pisteviivojen mukaiset jakaumat taas perustuvat kokonaan maailmanlaajuisiin malleihin.



**Kuva 4.** Kuten kuva 3, mutta nyt tarkasteltavana ovat sademäärän muutokset.

Näitä kuvia tarkasteltaessa on syytä muistaa kaksi asiaa:

1. Todennäköisimmän arvon lämpötilan tai sademäärän muutokselle kertoo jakauman huipun sijainti  $x$ -akselilla.
2. Epävarmuuden suuruuden kertoo jakauman leveys (mitä leveämpi jakauma, sen suurempi epävarmuus). Toisaalta epävarmuuden näkee myös jakauman huipun korkeudesta (mitä pienempi epävarmuus, sen korkeammalle jakauman huippu nousee).

Nämä asiat muistaen on helppo todeta, että alueellisten mallien mukaan ottaminen muuttaa parhaita arvioita lämpötilan ja sademäärän muutoksista Suomessa vain hyvin vähän (kuten oli jo pääteltävissä kuvista 1 ja 2).

Todennäköisyysjakauman leveys, eli arvioitu epävarmuuden suuruus muuttuu tyypillisesti hiukan enemmän. Ero ei kuitenkaan ole systemaattinen: joissain tapauksissa alueellisten mallien mukaan ottaminen leventää laskettua jakaumaa, joissakin tapauksissa se taas kaventaa sitä. Näille eroille ei ole mitään ilmeistä tulkintaa, eikä siis voida suoralta kädeltä sanoa, kumman menetelmän tuottamat epävarmuusarviot ovat luotettavampia. Osittain erot voivat olla täysin satunnaisiakin eli käytettävissä olleiden mallisimulaatioiden rajallisesta määrästä johtuvia<sup>1</sup>.

Edellä esitetyt kuvat kertovat jo varsin selvästi, etteivät lämpötilan ja sademäärän muutoksille saatavat todennäköisyysennusteet Suomessa juuri riipu siitä, otetaanko huomioon alueellisten ilmastomallien antama lisätieto vai ei. Sama pätee myös myöhempiä vuosikymmeniä (esim. 2041-2050) tarkasteltaessa (ei kuvaa).

Täydellisyyden vuoksi kuvissa 3 ja 4 esitetyt todennäköisyysennusteet annetaan alla myös taulukkomuodossa. Kussakin taulukon solussa annetaan kaksi lukuarvoa. Ylempi on saatu käyttämällä hyväksi sekä maailmanlaajuisten että alueellisten ilmastomallien tuloksia, alempi (suluissa) taas perustuu yksinomaan maailmanlaajuisten mallien tuloksiin.

**Taulukko 1.** *Todennäköisyysennusteet lämpötilan ja sademäärän muutoksille siirryttäessä jaksosta 1971-2000 jaksoon 2011-2020 Helsingin tienoilla Etelä-Suomessa ja Sodankylän kohdalla Pohjois-Suomessa. Epävarmuusväli tarkoittaa 5-95% väliä eli väliä, jolle lämpötilan ja sademäärän muutosten pitäisi osua 90% todennäköisyydellä. Kussakin taulukon solussa ylempi arvo on saatu käyttämällä sekä maailmanlaajuisten että alueellisten ilmastomallien tuloksia, alempi (suluissa) vain maailmanlaajuisten mallien tuloksia.*

LÄMPÖTILA	HELSINKI			SODANKYLÄ		
	Talvi	Kesä	Vuosi	Talvi	Kesä	Vuosi
Muutoksen mediaani (°C)	1.3 (1.3)	0.6 (0.6)	0.9 (0.9)	1.7 (1.6)	0.6 (0.7)	1.1 (1.1)
Epävarmuusväli (°C)	-0.5 – 3.0 (-0.4 – 3.0)	-0.2 – 1.5 (-0.3 – 1.6)	-0.1 – 1.9 (0.1 – 1.8)	-0.1 – 3.5 (-0.2 – 3.6)	-0.1 – 1.6 (-0.1 – 1.9)	0.1 – 2.1 (0.1 – 2.2)
Lämpenemisen todennäköisyys (%)	89 (91)	88 (90)	94 (96)	94 (94)	91 (92)	97 (97)

SADEMÄÄRÄ	HELSINKI			SODANKYLÄ		
	Talvi	Kesä	Vuosi	Talvi	Kesä	Vuosi
Muutoksen mediaani (%)	4 (5)	3 (3)	3 (4)	6 (5)	3 (3)	4 (4)
Epävarmuusväli (%)	-11 – 19 (-10 – 22)	-17 – 23 (-14 – 21)	-4 – 10 (-6 – 12)	-12 – 25 (-9 – 23)	-12 – 19 (-11 – 18)	-4 – 12 (-5 – 13)
Sademäärän kasvun todennäköisyys (%)	66 (69)	59 (62)	75 (75)	70 (73)	64 (63)	78 (76)

<sup>1</sup> Sama asia tilastotieteellisellä kielellä ilmaistuna: suhteessa isommat erot jakaumien leveydessä kuin keskiarvoissa voivat johtua siitä, että epävarmuuden suuruutta kuvaavien tunnuslukujen (esim. keskihajonta) otantavirheet ovat suurempia kuin keskiarvon otantavirhe.

Kumpi laskentatapa valitaankin, nähdään että lämpötilanmuutosennusteet ovat suhteellisesti ottaen paljon varmempia kuin ennusteet sademäärän muutoksesta. Paras arvio lämpötilan muutoksesta (mediaani) on talvella suurempi kuin kesällä, mutta myös epävarmuus on talvella suurempi talvilämpötilojen suuren vaihtelevuuden vuoksi. Vuosikeskilämpötilan muutoksen mediaani on 1°C luokkaa ja lämpenemisen todennäköisyys noin 95%. Todennäköisyyslukumat lämpenemiselle yksittäisinä vuodenaikoina vaihtelevat 90%:n molemmin puolin.

Todennäköisyys koko vuoden sademäärän kasvulle on 75%:n luokkaa. Paras arvio vuoden kokonaissademäärän muutokselle on 3-4%, siten että muutos olisi hiukan suurempi talvella kuin kesällä. Ennusteiden suureen, lähinnä ilmaston luonnollisesta vaihtelusta aiheutuvaan epävarmuuteen verrattuna nämä parhaina arvioina saadut muutokset ovat kuitenkin varsin vaatimattomia. Myöhempinä vuosikymmeninä sademäärän muutos kyllä tulee jo selvemmin esiin luonnollisen vaihtelun seasta: esimerkiksi vuosikymmenen 2041-2050 keskimääräinen vuosisademäärä on laskelmamme mukaan Helsingissä 90%:n ja Sodankylässä peräti 96%:n todennäköisyydellä jakson 1971-2000 keskiarvoa korkeampi (kun sekä maailmanlaajuisten että alueellisten ilmastomallien tulokset otetaan huomioon).

Kaikkiaan ennustetut lämpötilan ja sademäärän muutokset ovat Pohjois-Suomessa ("Sodankylä") hiukan suurempia kuin etelässä ("Helsinki"). Ennusteiden epävarmuuteen verrattuna tämä ero on kuitenkin pieni. Tämä jo tavallaan selittääkin, miksi alueellisten ilmastomallien mukaan ottaminen vaikuttaa ennusteisiin niin vähän. Kun pienimittakaavainen maantieteellinen vaihtelu "ilmastonmuutossignaalisissa" on Suomen alueella alueellistenkin mallien mukaan vähäistä, ei tämän vaihtelun tarkempi kuvaaminen kovin paljon ennusteita heilauta.

## **Liite: Lyhyt kuvaus laskentamenetelmästä**

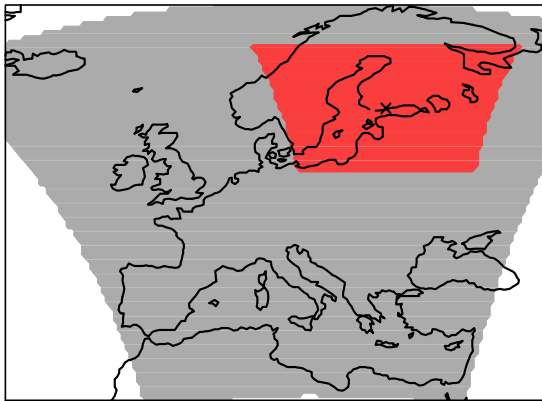
Tässä raportoidut laskelmat perustuvat 22:n CMIP3-vertailuun (3rd Coupled Model Intercomparison Project) osallistuvan maailmanlaajuisen ilmastomallin sekä 13:n ENSEMBLES-hankkeessa (ENSEMBLE-based Predictions of Climate Changes and their Impacts) tehdyn alueellisen ilmastomallisimulaation tuloksiin. Käytetyt CMIP3-mallit luetellaan Räisänen ja Ruokolaisen (2008) taulukossa 1 ja ENSEMBLES-simulaatiot Räisänen ja Ruokolaisen (2009) taulukossa 2.2. Kaikki nämä mallisimulaatiot perustuvat SRES A1B -päästöskenaarioon. Päästöskenaarioepävarmuutta ei siis oteta huomioon; lähivuosisikymmenien ilmastomuutoksia tarkasteltaessa tämä epävarmuus on kuitenkin vielä pieni.

Laskentamenetelmä on kolmivaiheinen:

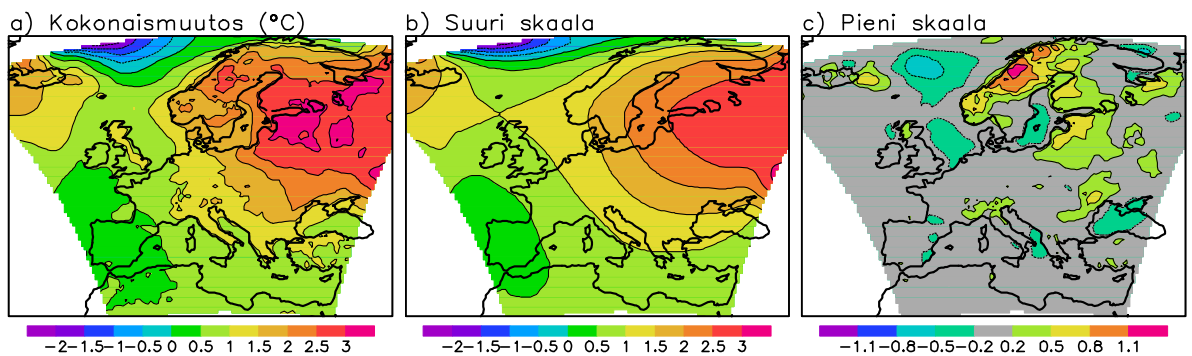
1. "Suuren mittakaavan" ilmastomuutoksille lasketaan todennäköisyysjakauma suoraan maailmanlaajuisen ilmastomallien tulosten perusteella. Tässä käytetään hyväksi uudelleenotantamenetelmää (Räisänen ja Ruokolainen 2006, Ruokolainen ja Räisänen 2007b), joka ottaa huomioon sekä ilmastomallien väliset erot että ilmaston luonnolliseen vaihteluun liittyvän epävarmuuden.
2. Alueellisten ilmastomallien avulla arvioidaan paikallisen ilmastomuutoksen todennäköisyysjakauma "suuren mittakaavan" ilmastomuutoksen funktiona.
3. Kohtien 1 ja 2 tulokset yhdistetään.

"Suuren mittakaavan" ilmastomuutokset määritellään lämpötilan ja sademäärän keskimääräisinä muutoksina 1500 × 1500 kilometrin alueelta tarkasteltavan hilapisteen

ympärillä (kuva A1; alue on siis neliönmuotoinen, vaikka kuvan karttaprojektio sitä vääristääkin). Tämä keskiarvoistusalue määritellään kullekin ennustushilapisteelle erikseen, siten että ennustuspiste on aina alueen keskellä. Kun laaditaan ennusteita hilapisteille, jotka ovat alueellisten ilmastomalliajojen kattaman alueen (kuvan A1 harmaa varjostus) reunojen lähellä, suuren mittakaavan muutosten laskemiseen käytettävää aluetta pienennetään itä-länsi-, pohjois-etelä- tai molemmissa suunnissa. Esimerkiksi jos tarkasteltava piste on vain 400 km:n päässä alueen pohjoisreunasta, kavennetaan suuren mittakaavan muutosten määrittelyssä käytettävä alue pohjois-eteläsuunnassa 800 km:n levyiseksi. Kuvassa A2 on esimerkin vuoksi jaettu yhdestä alueellisesta ilmastomallisimulaatiosta saatu talvikeskilämpötilan muutos suuren ja pienen mittakaavan osiinsa.



**Kuva A1.** Punainen varjostus näyttää suuren mittakaavan ilmastomuutosta laskettaessa käytetyn  $1500 \times 1500$  km alueen, kun tarkastellaan paikallista ilmastomuutosta Helsingin seudulla (risti). Harmaa varjostus näyttää alueen, jolta alueellisten ilmastomallien tuloksia oli saatavilla.



**Kuva A2.** Talven (joulu-helmikuu) keskilämpötilan muutos (°C) vuosien 1971-2000 ja 2011-2020 välillä englantilaisen Hadley-keskuksen HadRM3Q0-nimisellä alueellisella mallilla tehdyssä, maailmanlaajuisen HadCM3Q0-mallin antamiin reunaehtoihin perustuvassa simulaatiossa. (a) kokonaismuutos, (b) suuren mittakaavan muutos ja (c) pienen mittakaavan muutos eli a- ja b-kohtien erotus. Huomaa, että käyräväli on c-kohdassa tiheämpi kuin a- ja b-kuvissa.

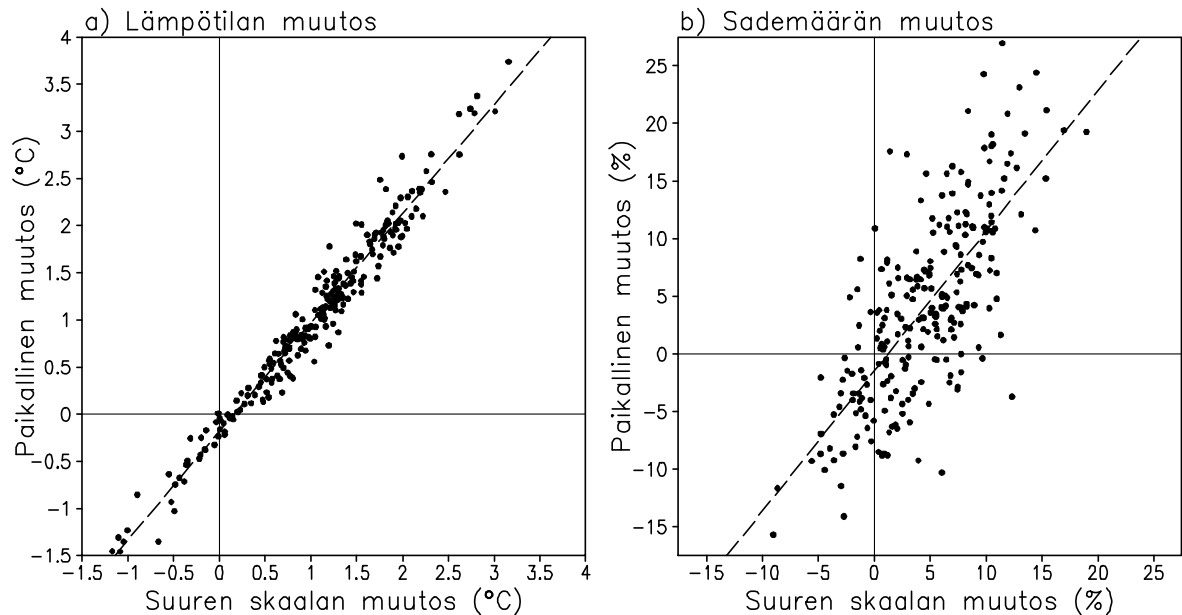
Aluksi siis arvioidaan suuren mittakaavan ilmastonmuutosten todennäköisyysjakauma CMIP3-hankkeen maailmanlaajuisia ilmastomalleja käyttäen, soveltaen Räisäsen ja Ruokolaisen (2006) sekä Ruokolaisen ja Räisäsen (2007) kuvaamaa uudelleenotantamenetelmää. Tästä on esimerkki kuvassa A4a.

Seuraavaksi tutkitaan ENSEMBLES-projektin alueellisia ilmastomallisimulaatioita käyttäen riippuvuutta paikallisten ilmastonmuutosten ja suuren mittakaavan ilmastonmuutosten välillä. Tuloksista johdetaan lineaarinen regressioyhtälö

$$\Delta x_{LOC} = a\Delta x_{LARGE} + b + e \quad (A1)$$

missä  $\Delta x_{LOC}$  kuvaa paikallista lämpötilan tai sademäärän muutosta ja  $\Delta x_{LARGE}$  vastaavaa suuren mittakaavan muutosta. Kulmakerroin  $a$  ja vakiotermin  $b$  määrätään tavalliseen tapaan pienemmän neliösumman menetelmällä. Termi  $e$  edustaa paikallisten ilmastonmuutosten satunnaisvaihtelua, jota ei voida ennustaa suuren mittakaavan ilmastonmuutosten perusteella.

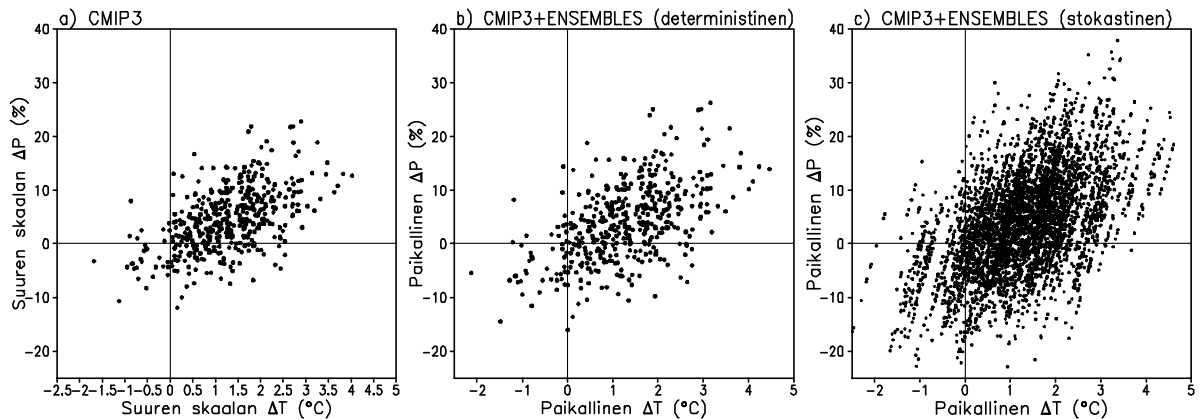
Kuvassa A3 näytetään esimerkkinä Helsingin seudun paikallisen talvi-ilmaston muutosten riippuvuus suuren mittakaavan ilmastonmuutoksista ENSEMBLES-simulaatioissa. Suoralta kädeltä havaitaan, että paikalliset lämpötilanmuutokset riippuvat erittäin vahvasti suuren mittakaavan muutoksesta: korrelaatio on peräti 0.98. Sademäärän tapauksessa korrelaatio paikallisen muutoksen ja suuren mittakaavan muutosten välillä sen sijaan on vain 0.73. Molemmissa tapauksissa yhtälön (A1) mukainen kulmakerroin on hiukan ykköstä suurempi, eli esimerkiksi 1°C nousua lämpötilan suuren mittakaavan aluekeskiarvossa vastaa hieman suurempi paikallinen muutos. Regressiokertoimien fysikaalista tulkintaa pohditaan enemmän Räisäsen ja Ruokolaisen (2009) raportissa.



**Kuva A3.** Talvi-ilmaston suuren mittakaavan muutosten (vaaka-akseli) ja Helsingin seudun (60.25°N, 24.75°E) paikallisten ilmastonmuutosten (pystyakseli) välinen riippuvuus ENSEMBLES-hankkeen alueellisissa ilmastomallisimulaatioissa. Otoskokoa on kasvatettu Räisäsen ja Ruokolaisen (2006) kehittämän uudelleenotantamenetelmän avulla. Katkoviivat kuvaavat yhtälön (A1) mukaista regressiosuoraa.

Kun regressioyhtälöstä (A1) otetaan huomioon vain kulmakerroin  $a$  ja vakiotermi  $b$ , saadaan parhaat arvaukset CMIP3-simulaatioiden suuren mittakaavan ilmastonmuutoksia (kuva A4a) vastaavista paikallisista muutoksista (kuva A4b). Todennäköisyyslaskelmia tehtäessä pitää kuitenkin ottaa huomioon myös pienen mittakaavan ilmastonmuutosten satunnaisvaihtelu, jota kuvaa yhtälön (A1) termi  $e$ . Tämä satunnaisvaihtelu lisätään ennusteeseen käyttäen normaalisti jakautuneita satunnaislukuja, joiden varianssi on sama kuin jäännöstermien  $e$  varianssi ENSEMBLES-hankkeen alueellisista mallisimulaatioista diagnostisoituna.

Kutakin “determinististä”, kuvan A4b mukaista lämpötilan tai sademäärän muutosta kohti arvotaan 10 satunnaislukua (kuva A4c). Koska lämpötilan ja sademäärän muutoksia tarkasteltaessa käytetään samaa satunnaislukujen sarjaa, järjestyvät näiden suureiden muutokset kuvassa keinoitekoisesti suorille viivoille. Menetelmä ei siis tällaisenaan tuota realistista yhteisjakamaa lämpötilan ja sademäärän samanaikaisille muutoksille, vaan ainoastaan todennäköisyysjakaumat kummankin suureen muutoksille erikseen.



**Kuva A4.** Uudelleenotantamenetelmän tuottamia talvikeskilämpötilan (vaaka-akseli) ja sademäärän (pystyakseli) muutoksia. (a) Suuren mittakaavan muutokset  $1500 \times 1500$  km alueella Helsingin ( $60.25^\circ\text{N}$ ,  $24.75^\circ\text{E}$ ) ympäristössä maailmanlaajuisissa CMIP3-simulaatioissa. (b) Parhaat arviot suuren mittakaavan muutoksia vastaavista paikallisista ilmastonmuutoksista (yhtälö (A1) ilman satunnaisvaihtelua). (c) Kuten (b), mutta paikallisten muutosten satunnaisvaihtelu on otettu huomioon. Lämpötilan ja sademäärän muutosten taipumus ryhmittyä suorille on menetelmään liittyvä epäfysikaalinen piirre (tarkemmin tekstissä).

## Kirjallisuusviitteet

- Meehl G.A. ym. 2007: The WCRP CMIP3 Multimodel Dataset: A New Era in Climate Change Research. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **88**, 1383-1394.
- Ruokolainen, L. ja J. Räisänen 2007a: Ilmastonmuutoksen todennäköisyysennusteita vuosikymmenelle 2011-2020. Dokumentti ACCLIM-hankkeen verkkosivuilla ([http://www.ilmatiiteenlaitos.fi/kuvat/ilmastonmuutoksen\\_todennakoisyysennusteita.pdf](http://www.ilmatiiteenlaitos.fi/kuvat/ilmastonmuutoksen_todennakoisyysennusteita.pdf)).
- Ruokolainen, L. ja J. Räisänen 2007b: Probabilistic forecasts of near-term climate change: sensitivity to adjustment of simulated variability and choice of baseline period. *Tellus*, **59A**, 309-320.

- Räisänen, J. ja L. Ruokolainen, 2006: Probabilistic forecasts of near-term climate change based on a resampling ensemble technique. *Tellus*, **58A**, 461-472.
- Räisänen, J. ja L. Ruokolainen, 2008: Ongoing global warming and local warm extremes: a case study of winter 2006-2007 in Helsinki, Finland. *Geophysica*, **44**, 45-65.
- Räisänen, J. ja L. Ruokolainen 2009: Probabilistic forecasts of temperature and precipitation change by combining results from global and regional climate models (CES Climate Modelling and Scenarios Deliverable D2.3). Verkkodokumentti osoitteessa [http://www.atm.helsinki.fi/~jaraisan/CES\\_D2.3/CES\\_D2.3.pdf](http://www.atm.helsinki.fi/~jaraisan/CES_D2.3/CES_D2.3.pdf).