

Tuuletusta ilmastokeskusteluun: konvektio ja sademetsien hupenevat ukkospilvet

Jouko Parantainen

Kirjoituksessa arvioidaan mahdollisuutta, että ilmaston lämpeneminen johtuisi lämmön konvektiivisen nousun heikkenemisestä tropiikin metsäisillä manneralueilla. Valtavien, stratosfääriin asti ulottuvien cumulonimbus-ukkospilvien ylläpitämää konvektiota voi verrata tuuletukseen, joka nostaa lämpöä ilmastolliselta päiväntasaajalta muille levysasteille ja edistää sen poistumista ilmakehästä. Konvektiossa nouseva lämpö kierrättää vettä, joka pisaroina rakentaa pilveä ja sataa takaisin maahan. Päivällä jäähdystystehoa lisäävät cumulonimbusten yläilmakehään tuottamat cirruspilvet. Konvektio on tehokasta ja auringon lämpövaikutukseen nähden oikea-aikaista vain päiväsaikaan ja mantereiden yllä, jossa sitä ylläpitävät maaston pieni lämpökapasiteetti sekä metsien ja ehkä myös luonnon aerosolien kosteutta sitovat ja pilvenmuodostusta edistävät ominaisuudet. Sademetsäalueilla jäähdystysteho on erittäin suuri.

Huomattava syy ilmastomuutokseen voisikin olla lämpenemisen kanssa rinta rinnan edennyt sademetsien tuho, mikä on johtanut tropiikissa mantereellista konvektiota ylläpitävien ukkospilvien ja muun pilvisyyden vähenemiseen, auringon vaikutuksen kasvuun ja kuivumiseen sekä kaukovaikutuksiin etenkin pohjoisella pallonpuoliskolla. "Aurinkovetoisen" mantereellisen konvektion vähetessä konvektio näyttää lisääntyneen merialueilla. Siellä konvektio kuitenkin painottuu yöaikaan eikä voi estää auringon suoraan lämpövaikutusta. Merialueilla ukkospilvet ovat myös matalampia ja täysi teho saavutetaan vasta pilvien kasautuessa suuriksi klustereiksi, joista osa voi yltyä trooppisiksi myrskyiksi tai hurrikaaneiksi. Mantereellisen konvektion väheneminen ja sen merellisen muodon lisääntyminen voisivat selittää auringon vaikutuksen kasvua ja merten lämpenemistä tropiikissa sekä

ylimääräisen lämmön siirtymistä korkeammille leveysasteille. Muutos voisi myös vähentää lämmön ja ilman nousua stratosfääriin. Esimerkki konvektioon perustuvan säätelyn merkityksestä saattaisi olla maapallon varhaisvaiheisiin sijoitettava niin sanottu "heikon auringon paradoksi", mihin liittyvät paljon odotusarvoja korkeammat lämpötilat selittyisivät mantereellisen konvektion puuttumisella, kunnes kasvillisuuden kehittyminen antoi sille tarvittavan tuen. Malli tarjoaa myös mahdollisuuksia selittää muinaisia ilmastokatastrofeja metsien tuhoamisesta johtuviksi.

Kaikista kasvihuonekaasuista tärkein on vesihöyry sekä siitä sukeutuvat sumut, pilvet ja sateet. Pilvet lämmittävät heijastamalla maasta kumpuavaa pitkäaaltoista lämpösäteilyä takaisin maahan ja sateet edustavat lämpöä sen latentissa, kosteuteen sidotussa muodossa. Toisaalta pisarat ja pilvet myös jäädyttävät ainakin yhtä suurella teholla heijastaessaan auringon lyhytaaltoista säteilyä takaisin avaruuteen (*albedovaikutus*), mikä leikkaa parhaimmillaan noin 80 prosenttia auringon säteilyvoimasta. Elämälle edellytykset antava *hyödyllinen kasvihuoneilmio* onkin lähes kokonaan veden haihtumiseen, pilviin, sateisiin sekä lumeen ja jäähän perustuvan vuorovaikutuksen, siis vettä kierrättävän järjestelmän varassa. Tämä "ilmastointi" on nostanut planeettamme keskilämpötilan sopivasti 14 astetta plussan puolelle ja pitänyt sen siellä jo vuosituhansien ajan alueittaisten, vuodenaikaisten ja vuorokaudenaikaisten vaihteluiden pysyessä siedettävänä. Vuorovaikutusten johdonmukaisuus ja mittasuhteet kertovat tehokkaasta *itsesäätelystä*, jolla "kasvihuoneemme" on pystynyt vastaamaan muuttuviin lämpöolosuhteisiin.

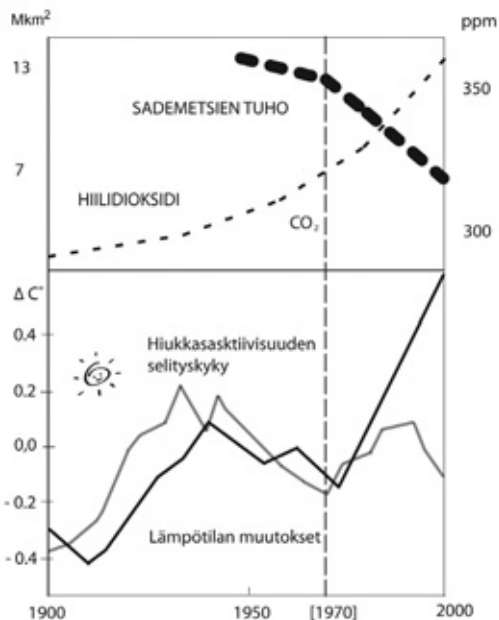
Myös nykyinen ilmastomuutoksen katsotaan perustuvan vesihöyryn ja pilvien ylläpitämään kasvihuonemekanismiin, joka vahvistaisi hiilidioksidin heikon lämpövaikutuksen merkittäväksi. Hiilidioksidivaikutuksen moninkertaistuminen

johtuisi hillitsevien *negatiivisten palautteiden*, kuten albedovaikutuksen (pilvet, lumi, jne.) heikkenemisestä ja kääntymisestä lämpenemistä lisäävien *positiivisten palautteiden* itse itseään voimistavaksi kierteen. Laboratorio-olosuhteissa sekä Venuksen ja Marsin ilmakehissä hiilidioksidi lämmittääkin tehokkaasti, mutta myös kaasupitoisuudet ovat näissä tapauksissa suuret ja tärkein maan ilmastoon vaikuttava tekijä, vesihöyryyn ja pilviin perustuva itsesäätely, puuttuu. Sen sijaan pysyttäessä maan pinnalla ja ilmakehässä hiilidioksidin lämmittävästä vaikutuksesta pitäisi puhua vain hypoteesina tai asiantuntijoiden enemmistön mielipiteenä, valistuneena arvauksena. Ilmasto selvästikin lämpenee, mutta johtuuko tämä hiilidioksidista on jäänyt kasvavasta vakuuttelusta huolimatta avoimeksi.

Kriitikkojen mielestä ilmaston itsesäätelyn ja etenkin lämpenemistä estävien negatiivisten palautteiden merkitystä ei painoteta riittävästi, vaihtoehtoisia selitysmahdollisuuksia ei aina kuunnella, eivätkä hiilidioksiditasot ole edes järkevässä suhteessa lämpenemiskehitykseen. Viime vuosisadan alusta aina 1970-luvun puoliväliin saakka ilmasto lämpeni ja jäähdyi hiilidioksiditasoista (kuvassa ppm = tilavuuden miljoonasosa) riippumatta ja vasta noin kolmen viime vuosikymmenen ajan muuttujilla on ollut sama suunta.

Myöskään paleoklimatologian ei voi väittää todistavan hiilidioksidin tärkeyttä. Paksujen jääkerrosten kaasukuplista johdetut arviot muinaisista hiilidioksiditasoista ja lämpötiloista tosin viittaavat vaikutusyhteyteen, joka olisi saattanut kestää vieläpä satoja tuhansia vuosia, mutta ongelmaksi nouseekin kausaalisuus: on aivan yhtä perusteltua väittää lämpenemisjaksojen edeltäneen hiilidioksiditasojen nousuja kuin päinvastoin (Kump 2002). Lämmön nousun *tiedetään* vapauttavan hiilidioksidia ja metaania maaperästä ja merten valtavista varastoista, kun taas vastakkainen vaikutussuhde on vain olettamus.

Nykyisin ilmaston lämpeneminen selitetään ilmakehään jäävän pitkäaaltosen lämpösäteilyn kasvuna. Auringolla itsellään ei oleteta olevan ilmastomuutosta edistävää vaikutusta, kun taas kasvihuonekaasujen kyky estää lämmön poistumista johtaisi tähän väistämättä. Vallitseva ajattelu painottuu fysiikkaan ja globaaliin keskiarvoihin, pilvien vaikutus kuvataan pääasiassa lämmittäväksi ja luonto on mukana vain moduloivana tekijänä. Toisin kuin "oikeassa" lasisessa kasvihuoneessa *konvektiolle*, eli arkikielellä ilmaisten "tuuletukselle", ei anneta erityistä merkitystä. Nyt käsillä olevassa kasvihuonemallissa selityksen painopiste on tropiikissa ja tropii-



Kuva 1. Auringon magneetikentällä ja hiukkasaktiivisuudella (aurinkotuulella) on voinut olla huomattava ilmastoa säätelevä vaikutus viime vuosisadan puolella. Vaikutusten toteuttajina olisivat olleet aerosolien sähkökemialliset ominaisuudet, pilvenmuodostus ja lopulta auringon lyhytaaltainen säteily. Hiukkasvaikutus jatkui 1970-luvun puoliväliin saakka, jolloin se kääntyi laskuun ja ilmaston lämpeneminen alkoi vasta toden teolla.

kin auringon vaikutuksessa, jonka hillitsemisessä ukkospilvien ylläpitämällä mantereellisella konvektiolla, luonnon aerosoleilla ja sademetsillä voi olla huomattava asema.

Auringon, pilvien ja pienhiukkasten vuorovaikutus

Pilvien kahtalaiset, yhtä lailla jäähdyttävät ja lämmittävät ominaisuudet, tulivat dramaattisestisesti esille Yhdysvalloissa vuoden 2001 terrori-iskua seuranneen lentokiellon aikana. Lentoliikenteen taivaalle piirtämät tiivistymisjuovat kutoutuvat normaalisti koko mantereen laajuiseksi pilviharsoksi (*haze*), mutta kun pilviverho sitten liikenteen lakattua haihtui, päivälämpötilat kohosivat noin asteella öiden tullessa saman kylmemmiksi. Koska ohuet *cirruspilvet* jäähdyttävät

estämällä auringon vaikutusta ja lämmittävät pidättämällä maasta kohoavaa lämpösäteilyä, nettovaikutus jää riippumaan ajankohdasta ja paikallisista olosuhteista. Arkikokemuksin kerroo, että pilvien tarjoamasta jäähdytyksestä on apua kesäisin, puolen päivän jälkeen ja yleensä auringon paistaessa voimakkaasti. Pilvien suoman lämmön taas kokee selvimmin yöaikaan kun muutoin olisi kylmä.

Havainnot ilmaston lämpenemiseen liittyvistä pilvimuutoksista näyttävät kertaavan samaa kaavaa alueellisesti. Pilvet ovat vähentyneet tropiikissa ja lisääntyneet "talvisilla", korkeammilla leveysasteilla, etenkin pohjoisessa. Mittaamalla maasta kuun pimeälle pinnalle syntyvää kokonaisheijastumaa ("earthshine") vuodesta 1984 lähtien on laskettu, että pilvisyyden väheneminen on lisännyt auringosta maan pinnalle tulevaa säteilyä (noin 8 W/m²), mutta 1900-luvun loppua kohden pilvisyys on kääntynyt kasvuun tropiikin ulkopuolella (Pallé ym. 2004). Pilvien vähehtessä tropiikkiin tulee ylimääräistä auringon lämpösäteilyä. Lisääntyneestä auringon vaikutuksesta kertovat myös tropiikkiin lämpötaseen kasvu (Chen ym. 2002) ja merkit sademetsäalueiden kuivumisesta (Hutyra ym. 2005). Myös virallisten tilastojen (IPCC, 2007) mukaan pilvisyys on vähentynyt tropiikissa, mutta pääosin kasvanut muualla. Näkyvä esimerkki tropiikin muutoksista on Kilimanjaron valkolakin hupeneminen, kun kasvava auringon vaikutus lisää haihtumista ja vähentää sateita.

Koska pilvien vaikutus riippuu pisarakoosta, paksuudesta, sijainnista, eliniästä ja vuorokaudenajasta on nettovaikutusta usein vaikea arvioida. Ilmakehän pienhiukkaset eli aerosolit edistävät vesipisaroiden ja pilvien muodostumista tarjoamalla kosteudelle ytimet joiden ympärille tiivistyy. Aerosolit voivat itsekin jäähdyttää, mutta ennen kaikkea ne säätelevät vesipisaroiden kokoa, heijastusominaisuuksia sekä elinikää. Pisaroista pienimmät leikkaavat auringon säteilyvoimaa tehokkaimmin ja myös säilyvät ilmassa kauimmin, jolloin pilvillä on suuri jäähdyttävä albedovaikutus (Charlson ym. 1987, Kulmala ym. 2001, O'Dowd ym. 2002). Suuret pisarat putoavat herkemmin alas sateina. Kasvillisuus voi päästää aerosoleiksi ilmaan yksinkertaisia kemiallisia yhdisteitä, jotka ominaisilla vaikutuksillaan suosivat jäähdyttävien tai satavien pilvien syntyä. Tunnettu esimerkki on kasvisplanktonin hajotessa vapautuva rikkiyhdiste dimetyylisulfidi (DMS), jonka tuottamat kirkkaan valkoiset pilvet antavat erittäin suuren albedovaikutuksen. Meriveden lämmitessä eläinplankton alkaa hajottaa

kasviplanktonia, minkä seurauksena pilvenmuodostus ja jäähdytys tehostuvat aivan termostaattisella tavalla (Charlson ym. 1987). Kehittyvän negatiivisen palautteen selitysvuorosta kiistellään, mutta periaate sinänsä toimii ja samankaltaisia rikkiyhdisteitä muodostuu luonnossa muuallakin (Shaw ym. 1998). Metsät tuottavat aerosoleiksi orgaanisia yhdisteitä, kuten terpeenejä, joiden yhteyttä pilvenmuodostukseen tutkitaan paljon myös Suomessa (Kulmala ym. 2001, 2003). Merialueilla yleisimpiä aerosoleja ovat aaltojen pärskeistä ilmaan nousevat suolakiteet ja jodi. Lisäksi teollisuus, maatalous ja liikenne tuottavat paljon pienhiukkasia, jotka voivat toimia aerosoleina ja häiritä luonnon aerosolien vaikutuksia.

Mahdollisesti hyvin tärkeänä, mutta vielä lopullisesti varmistamattana tietona on esitetty, että auringon magneettisesta aktiivisuudesta kertova aurinkotuuli vaikuttaa kosmiseen säteilyyn ja ilmakehän pienhiukkasiin, tätä kautta pilvenmuodostukseen ja siten auringosta tulevan säteilyn määrään (Svensmark ym. 1997). Magneettisten häiriöiden ja ilmastomuutoksen välillä voi siten olla riippuvuus, joka selittyisi lopulta pilvimuutosten ja auringon lämpövaikutuksen kautta. Hiukkasaktiivisuuteen liittyvä lämmittävä vaikutus näyttää jatkuneen aina 1970-luvun puoliväliin asti, jolloin se kääntyi laskuun mutta lämpeneminen vasta toden teolla alkoi (ks. kuva 1). Tästä taitekohdasta lähtien ilmastomuutokselle ei enää voitu osoittaa luonnollista aiheuttajaa, minkä vuoksi myös ihmisen osuus tuli uudella tavalla kiinnostavaksi. Kolmen viime vuosikymmenen aikana ilmasto on lämmennyt puolisen astetta, mutta yleisemmin on totuttu puhumaan 0.6–0.7 asteen tasoisesta lämpenemisestä sadan vuoden aikana. Vuoteen 2050 ulottuvassa ennusteessa (IPCC, 2007) lämpenemistasoksi lasketaan tulevan noin kolme astetta (1.0^o–6.4^o).

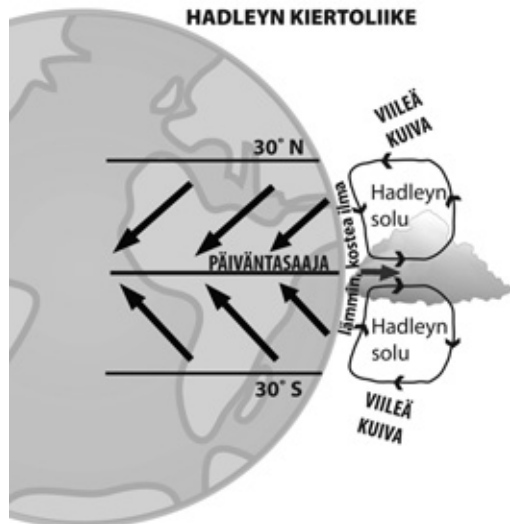
Säätelevät pilvet ja termostaatit

Tropiikin pilvien väheneminen on todettu useissa tutkimuksissa, mutta selvää syytä trendiin ei tiedetä, eivätkä seurauksetkaan ole aina selvät pilvien moninaisten vaikutuksen takia. Eräänlaisena läpimurtotyönä on pidetty satelliittitutkimuksia (Chen ym. 2002, Wielicki ym. 2002), joiden mukaan tropiikin lämpötase, joka kuvastaa sisään tulevan ja poistuvan lämmön kokonaismäärää, on kasvanut 1980-luvulta lähtien huomattavasti, mutta on arvioitu aikaisemmissa tutkimuksissa aivan liian pieneksi. Vaikka muutos tutkitulla alueella (20°N–20°S) oli suurempi kuin hiilidioksidita-

sojen kaksinkertaistumiseen perustuvissa ennusteissa, ilmiötä ei ollut havaittu alailmakehän mittauksissa eikä käytettäessä näihin mittauksiin perustuvia yleisen kiertoliikkeen ilmastomalleja, joissa lämpötase jäi 2–4 kertaa pienemmäksi. Lämpö ei myöskään liittynyt vallitsevan teorian edellyttämällä tavalla pilvien lisääntymiseen vaan niiden vähenemiseen. Syynä ei siten voinut olla kasvihuonekaasuista ja pilvistä maahan takaisin säteilevä lämpö vaan tropiikin taivaalta hohkaava aurinko, jolla ei pitänyt olla merkittävää asemaa ilmaston lämpenemisessä (myös: Hartmann 2002). Tropiikista poistuvat lämpimät ilmassat näyttivät liittyvän kasvaneeseen *Hadley'n kiertoon*, suureen ilmastolliseen kiertoliikkeeseen, jonka valtavat *cumulonimbus-ukkospilvet* nostavat tropiikin lämpöä ilmastolliselta päiväntasaajalta yläilmakehään ja edelleen korkeammille leveysasteille, joilta virtaukset palaavat pasaatituulina takaisin lähtökohtaansa (kuva 2). Konvektiosta käyttövoimansa saavat kiertoliikkeet vyöryttävät tropiikin lämpöä vaihteittain aina navoille saakka. ”Tropiikin lämpökone” (*tropical heat machine*), kuten ukkospilviä ja niiden ketjua on tapana kutsua, näytti toimivan kuin ylikierroksilla.

Lämpötaseen kasvu ei olisi ongelma, jos sisään tuleva ja poistuva lämpö pysyisivät tasapainossa, siis ylimäärä saataisiin poistettua. Lämpöä kuitenkin siirtyy muille leveysasteille, ja kasvavaan vaikutukseen tropiikissa viittaa erityisesti merten lämpötilojen nousu. *Veden suuri lämpökapasiteetti* sekä merten loppumattomat vesimassat nielevät auringosta tunkevaa lämpösäteilyä satojen metrien syvyyteen asti. Intian ja Tyynen valtameren alueille on muodostunut valtavia lämpimän veden ”altaita” (*warm pools*), joille kasaantuu ukkospilviä jättiläismäisiksi klustereiksi (Houze 2004). Konvektiota ylläpitävien ukkospilvien muodostus ja lämmön nousu alkavat pintalämpötilan lähestyessä kolmeakymmentä astetta. Tätä on pidetty merkinä *termostaattisesta säätelystä*, pääasiassa haihdutukseen, konvektioon ja pilvenmuodostukseen perustuvasta *negatiivisesta palautteesta*, jonka tehtävänä on pitää lämpeneminen kurissa. Haihdutus sinänsä jäädyttää, ja kosteutta tarvitaan sekä pilvenmuodostukseen että lämmön konvektiiviseen nousuun. Edellä kuvattu kasviplanktonin yhteys pilvenmuodostukseen (Charlson ym. 1987) edustaa pitkälle kehittyntä merellistä termostaattitoimintaa.

Ilmaston termostaattista itsesäätelyä on haettu myös yläpilvien tasolta. *Ramanathanin ja Collinsin* (1991) termostaattihypoteesi perustuu *cirruspilvien* jäädyttävään albedovaiikutukseen. Sitä, että cirruspilvien lisääntymistä todetaan tropii-



Kuva 2. Lämpöä tropiikista korkeammille leveysasteille kuljettava Hadley'n kiertoliike saa voimansa ilmastollisen päiväntasaajan ukkospilvien ylläpitämästä konvektiosta. Suuret nuolet osoittavat kiertoliikkeiden palaamista päiväntasaajalle pasaatituulina.

kin lämmenneiden merialueiden yläpuolella, voidaankin pitää merkinä itsesäätelyyn perustuvan jäädytyksen mahdollisuudesta. Kuten yleensä pilvivaikutuksissa, tulkintaa mutkistavat pilvien lämmittävät (pääasiassa yönaikaiset) ominaisuudet, joita vallitseva ilmastoselitys korostaa. Toinen, niinikään cirruspilviin perustuva termostaattiajatus on *Lindzenin* (2001) ”*iris-hypoteesi*”. Vallitsevan näkemyksen mukaisesti hän arvioi cirruspilvien lämmittävän, mutta olettaa pilviverhoon syntyvän tarpeen mukaan aukkoja, joista lämpö pääsisi säteilemään avaruuteen. Cirruspilvi ”avautuisi” nousevalle lämmölle ”infra-punatermostaatin” säätelänä, samaan tapaan kuin silmän iris laajenee akkommodoituessaan pimeään. Termostaattisuuden vuoksi ilmasto ei yksinkertaisesti voisi lämmitä liikaa. Iris-hypoteesia ilmastomallien avulla testatessa cirruspilvien vaikutus on ollut pikemminkin jäädyttävä ja mahdolliset aukot voisivat jopa lämmittää raottaessaan verhoa myös sisään tulevalle auringon säteille (Hartmann ja Michelsen 2002). Tulokset sopivat paremmin Ramanathanin ja Collinsin ajatteluun samalla kun ne kyseenalaistavat vallitsevan lämpenemisteorian pilviolettamuksia.

Ilmastoa jähdyttävät ukkospilvet

Ukonilmat syntyvät lämpötilaeroista, mutta myös tasaavat niitä sekä paikallisesti että globaalises-
sa mitassa. Avaruudesta katsoen tropiikin suuret ukkospilvet näkyvät maapalloa kiertävänä pum-
pulimaisena vyönä, ilmastollisena päiväntasaajana, joka vaeltaa vuodenaikojen mukana etelään ja pohjoiseen. Ukkospilvien rintama tunnetaan myös pasaatituulten kohtaamisvyöhykkeenä (*Intertropical Convergence Zone, ITCZ*), jolta ukkospilvien ylläpitämä konvektio antaa voiman Hadley'n kiertoliikkeelle ja lämmön siirtymiselle pois tropiikista (ks. kuva 2).

Konvektion keskuksena oleva valtava *cumulonimbuspilvi* on kuin vesipisaroista muotoutuva lämpöeristetty hormi tai tuuletuskanava, jonka sisällä lämpö ja kosteus pääsevät kohoamaan. Pilven laajuus maa-alueiden yllä voi olla kymmeniä, satojakin neliökilometrejä, mutta merillä usein paljon enemmän. Nousevien ilmassojen kehittämä alipaine vetää pilveen lämmintä kosteaa ilmaa, mikä ylläpitää alueellista matalapainetta. Konvektio jähdyttää tropiikkia poistamalla pääasiassa kosteaa lämpöä (*latent heat*), ja vesihöyryn määrää vielä kasvattaa etelästä ja pohjoisesta tulevien pasaatituulten kohtaaminen (*kosteuden konvergenssi*). Suhteessa vähemmän nousee kuivaa lämpöä (*sensible heat*), joka runsaana voisi hapertaa pilveä. Kohotessaan ilmapvirtaus jäähtyy ja palauttaa vesihöyrystä kondensoituvan veden maahan konvektiosateina. Aerosolien merkitys konvektiolle voi olla huomattava vaikuttamalla sekä pilvenmuodostukseen että satamiseen. Konvektio myös kuljettaa aerosoleja ja niiden esiasteita ilmakehän yläosaan (*Shaw ym.* 1998). Sateiden jatkuvuus on konvektion edellytys ja samalla sen tehon tärkein mitta (*precipitation efficiency*). Järjestelmän mittasuhteita kuvaa se, että suurin osa sateista tulee alas tropiikissa ja erityisesti konvektiosateina.

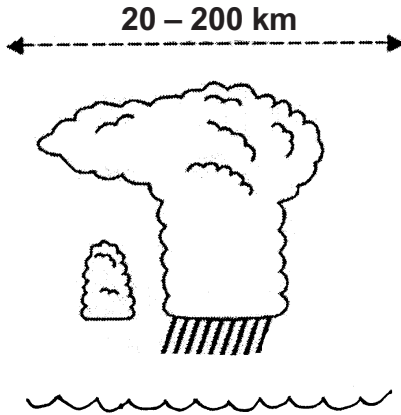
Cumulonimbuspilvet kohottautuvat alailma-kehästä troposfääriin ylärajalle stratosfääriin, aina 14–20 kilometrin korkeuteen asti. Yläpäästään jääkiteinen pilvitorni (*convective cell*) on ukkospilvien (*thunder cell*) perityyppi ja jännite-erot pilven lämpöä höyryävän alapään ja jääkiteisen yläpään välillä purkautuvat salamointina. Lämpö poistuu kohtisuoraan ylös ja ukonilman jälkeen ilma yleensä jäähtyy, mitä laskevat kylmät virtaukset ja rakeet tehostavat ainakin kokemuksen tasolla. Hattuna olevan cirruspilven toispuolisuuden vuoksi cumulonimbuskuvataan muistuttavan *alasinta*. Vertailukohtana on käytetty myös ydinräjähdysten sienimäistä pilveä, jolle anta-

vatkin oikeutta tropiikin pilvikolossien valtavat energiat. Suuren ukkospilven nimitys "*hot tower*" on nousevan lämmön vuoksi ymmärrettävä, mutta jähdytysvaikutusten vuoksi se on nurinkurinen kuten *Gray* (1973) perustelee ehdottaen nimitykseksi "*cooling tower*". Toiminnoiltaan pilvi onkin verrattavissa lämpövoimalaitosten jähdytystorneihin (*Guan ja Reuter* 1995). Vaikka cumulonimbuspilviin perustuva jähdytys ja lämmön taseus ovat kiihkeintä ilmastollisella päiväntasaajalla, joka on samalla Hadley'n kier-
ron nousukohta ja siten ilmastollisen vaikuttamisen tärkeä risteysasema, konvektion yhteyksiä ilmastomuutokseen on tutkittu hämmästyttävän vähän. Ukkosten esiintymistiheyttä tutkinut *R. W. Spencer* on todennut että pilvitornit kattavat ehkä vain yhden prosentin verran pallomme pinta-alasta (noin 5 Mkm²), mutta niiden merkitys pitäisikin suhteuttaa siirtyvän lämmön ja kosteuden määriin (muistinvarainen tieto).

Tropiikin cumulonimbuspilven voidaan katsoa jähdyttävän usealla tavalla. Ensinnäkin osa konvektiossa nousevasta lämmöstä pääsee säteilemään tai muuten poistumaan avaruuteen. Mitä korkeammalle lämpö saadaan nousemaan, sitä merkittävämmäksi tämän osan voi arvioida kasvavan. Toiseksi konvektio tasaa lämpötilaeroja ohjaamalla tropiikin liikaa lämpöä Hadley'n kierron mukana korkeammille leveysasteille. Kolmanneksi jähdytysvaikutus voi perustua cirruspilviin. Cumulonimbuspilven "hattuna" on laakea, jopa satojen neliökilometriä laajuinen cirruspilvi, ja riippuen nousevan lämmön ja kosteuden määrästä pilvitorni voi "tuprutella" cirruksia enemmänkin (*detrainment*). Edellä kuvattu *Ramanathanin ja Collinsin* (1991) esittämä termostaattinen säätely perustuu cirruspilvien jähdyttävään albedovaikutukseen.

Mantereellisen ja merellisen konvektion eroja

Arvioitaessa konvektion globaalia merkitystä ilmastotutkimus on kiinnittänyt huomionsa pääasiassa tämän merelliseen muotoon (*Ramanathan ja Collins* 1991, *Pierrehumbert* 2000, *Lindzen ym.* 2001). Yleisesti katsoen konvektio lieneekin tropiikissa runsaampaa merialueiden kuin vähäisten maa-alueiden yläpuolella ja merialueiden ukkospilvien keräymät, klusterit, voivat käsittää kymmenien tuhansien neliökilometriä alan (kuva 3). On myös merkkejä että merellinen konvektio olisi viime vuosikymmeninä saattanut lisääntyä (*IPCC* 2007). Kuitenkin sekä esiinty-



Kuva 3. Trooppisilla merillä konvektiota ylläpitävät ukkospilvet voivat saavuttaa valtavan laajuuden, minkä takia ne myös muuttuvat helposti trooppisiksi myrskyiksi ja hurrikaaneiksi. Mantereellisen konvektion ukkospilvet ovat alaltaan pienempiä, mutta kasvavat helpommin korkeutta aina stratosfääriin saakka.

mistiheyksinä, pilvikorkeuksina että nousevan lämmön määrissä mitaten konvektio on kasvillisuuden peittämien maa-alueiden yllä paljon tehokkaampaa. *Salamointi*, cumulonimbuspilvien kauas näkyvä ja kuuluvakin tunnusmerkki, on mantereilla jopa 10 kertaa runsaampaa kuin merillä. *Houzen* (2004) mukaan voidaan puhua jopa dramaattisista eroista mantereellisen ja merellisen konvektion välillä.

Zeng ja Neelin (1999) osoittavat nämä konvektion muodot jo perustoiltaan aivan erilaisiksi. Maa-alueet reagoivat herkästi lämpötilan nousuun ja alkavat pienen lämpökapasiteettinsa vuoksi heti luovuttaa lämpöä. *Mantereellisen konvektion käyttövoimana on aurinko* ja konvektio saavuttaaikin huippunsa iltapäivällä kun lämpökertymä on suurimmillaan. Jäähdyttävän tehon voi siksi olettaa olevan suhteessa auringosta tulevaan lämpöön ja maa-alueiden herkän reagoimisen vuoksi jopa lähestyvän *termostaattisuutta*. Vaikuttavia tekijöitä voivat olla lämpö, kosteus, haihdutus, tuulet, kasvillisuus, aerosolit ja maaperä, mutta konvektio voi käynnistyä heti kun kynnysarvot ylitetään. Konvektio ohjaa lämmön kohtisuoraan nousuun, pois tropiikista, kun taas vapaassa nousussa lämpö leviäisi myös vaakasuoraan (*advektio*) tuulten mukana. Niinikään on huomattava, että aerosolipartikkeleiden pienempi koko mantereiden yllä (*Sherwood* 2002) voi antaa ukkospilven tuottamille cirruksille suuremman jäähdytystehon.

Merialueilla konvektio alkaa hitaammin ja on olennaisesti tehottomampaa. Käyttövoima ote-

taan veden pintalämpötilasta, mutta vesialueiden massan ja suuren lämpökapasiteetin vuoksi konvektio viivästyy, saavuttaen täyden voiman vasta aamuyöllä kun veden pinta on ilmaa lämpimämpi. Siten merellinen konvektio ei seuraa oikea-aikaisesti auringosta tulevaa lämpökuormitusta vaan on puoli vuorokautta myöhässä. Vasta seuraavana aamuna alkavaa tuuletusta ei voi pitää tehokkaana ja cirrusten jäähdyttävä albedovaikeus jää yöllä kokonaan hyödyntämättä. *Kun päivisin lämmittää aurinko sekä öisin kosteus ja pilvet, lämpö ei pääse pois kasvihuoneestamme*. Merialueilla ukkospilvien tornit ovat matalampia ja vasta pilvien pakkautuminen klustereiksi antaa niille voiman yltää stratosfääriin asti. Merellinen konvektio jäähdyttää tropiikkia, mutta jos lämpö ei nouse korkealle, sillä on huomomat edellytykset säteillä tai siirtyä pois ilmakehästä. Merialueiden ongelmiin liittyy myös uhka ukkospilvien (*convective cell*) muuttumisesta trooppisiksi myrskyiksi (*storm cell*) ja edelleen hurrikaaneiksi tai tornadoiksi (*super cell*).

Edellä kuvattu tropiikin lämpötaseen kasvu oli yhteydessä Hadley'n kierron lisääntyneeseen aktiivisuuteen (*Chen ym.* 2002, *Hartmann* 2002), siten ukkospilvien ylläpitämään konvektioon ja mitä ilmeisimmin tämän merellisen muodon kasvuun. Trooppisten merien lämpenemisestä kertoo muun muassa Intian ja Tyynen valtameren alueilta Pohjois-Atlantille purkautuvan ilmavirtauksen, *Rosby'n aallon* aktivoituminen mahdollisena varaventiilinä. Tämä suihkuvirtaksen kaltainen kaukovaikutus on niin voimakas, että se voisi vastata pohjoisatlanttisen alueen niin sanotusta NAOaktiivisuuden (*North Atlantic Oscillation*) kasvusta talviaikana (*Hoerling ym* 2001). *Hurrellin* (1996) mukaan NAO-aktiivisuuden kasvu voisi riittää selittämään suuren osan pohjoisen pallonpuoliskon talvista lämpenemistä. Samaan tapaan meriveden voimakas lämpeneminen *El Niño -ilmiön* yhteydessä voi käynnistää konvektion, joka lämmittää alueita tuhansien kilometrien päässä (*Cess ym.* 2001, *Pielke ym.* 2002, *Rodwell ja Folland* 2002). Meriltä lähteviä kaukovaikutuksia on kuvattu myös tropiikin manneralueilla (*Bader ja Latif* 2003).

Sademetsien yhteys mantereelliseen konvektioon

Perimätieto ja satunnaiset tutkimusraportit viijaavat, että kasvillisuus saattaisi ikään kuin "vetää" kosteutta ja sateita puoleensa. Ottermanin (1974) mukaan aavikoitumisprosessi tyrehtyttää

konvektion ja vähentää siten sateiden määrää. Charney (1975) kuvaa muutosta kierteenä, jossa kasvillisuuden häviäminen ja kuivuus ruokivat toisiaan. Aavikon lämpö kohoaa, mutta kosteuden puuttuessa se ei pysty synnyttämään konvektioon tarvittavaa pilvihormia vaan leviää tuulten mukana. Kasvien "aktiivisuus" on helppo kuitata mystiikkana. Kasvit päästävät ilmaan pienhiukkasiaan – muun muassa nopean kasvun, kuivuuden ja kuumuuden aikana – sitomaan kosteutta sekä ohjaamaan pilvenmuodostusta ja sateita. Tätä voisi hyvinkin kutsua "aktiivisuudeksi" ja jopa "kosteuden houkutteluksi". Toimimalla tiivistymisytiminä aerosolit vaikuttavat pisarakokoon ja siten pilvien ominaisuuksiin ja sateisiin. On esimerkiksi osoitettu, että yhteytyksessä sivutuotteina syntyvät pienhiukkaset voivat vapautua kaasuihin ja saada aerosoliominaisuutensa vasta ilmassa (Kulmala ym. 2003, O'Dowd ym. 2002). Toisaalta myös itiöt, siitepöly sekä kasvien karisevat jäänteet ja pöly voivat ilmaan noustessaan vaikuttaa aerosolien tavoin. Luonnon aerosolien määrät ovat huomattavasti suurempia maa-alueitten kuin merten yläpuolella. Sademetsien yllä tasot ovat melko matalia, mutta aerosoleilla on vuorokautista vaihtelua ja alueet ovat herkkiä ulkopuolisille aerosoleille (Rissler ym. 2004). Yleisesti aerosolien olettaisi olevan tärkeitä etenkin mantereellisessä konvektiossa, jossa kosteuden säilyttämisen olettaisi olevan ongelmallisempaa kuin merillä.

Kasvillisuus, aerosolit ja konvektio voisivat selittää miksi maa-alueilla on pinta-alaan nähden enemmän sateita ja etenkin ukkosia kuin merillä ja aavikoilla. Metsillä on edellytykset sitoa ja hyödyntää ilmapirtausten tuomaa kosteutta tarjoamalla tälle lehvästönsä verran tiivistymispintaa. Sademetsien haihdutustehoa voi verrata ilmakehän kostutukseen, ja puut kykenevät myös itse säätämään haihdutusta lehtirakojensa avulla. Kosteutta lisäävät sademetsien sijainti vesistöjen läheisyydessä sekä etelästä ja pohjoisesta tulevat pasaatituulet. Kysymys on veden kierrätyksestä ja lähi-ilmastoon laaja-alaista itsesäätelystä, olosuhteiden hallinnasta, josta Osborne (ym. 2004) käyttää nimitystä *self-sustainability*. Mielikuva "sadettavasta metsästä" ei ole kaukana. Metsämaaston ja latvuston karhea, kumpuileva epätasaisuus vaimentaa tuulta ja siten riskiä, että pilvimuodostelmat hajoaisivat ennen aikojaan tai pakkautuisivat suuriksi rykelmiksi, kuten merillä on mahdollista. Kukkulat antavat kosteille pasaatituulille nostoa ja voimakkaimmin nämä *orografiset voimat* tuntuvat vuorten rinteillä, joilla sateita voi tulla reippaasti yli kuusi metriä vuo-

deda. Costa Rican vuoristoissa kosteilla sademetsäalueilla (Monteverden pilvimetsät) suurten konvektiopilvien muodostus on runsasta, mutta vähenee – ja pilvikoko pienenee – heti siirryttäessä viereiselle tuhotulle sademetsäalueelle tai puuttomalle tasangolle (Lawton ym. 2001, Ray ym. 2006, Pielke 2002).

Sademetsien tuhon ilmastovaikutuksia

Tropiikin metsien tuholla on selkeä ajallinen yhteys ilmaston lämpenemiseen. Vaikka sademetsiä on kaadettu ja hävitetty ainakin 1800-luvun lopusta lähtien, niitä oli jäljellä vielä 1950-luvulla noin 13 miljoonaa neliökilometriä. Vasta tämän jälkeen sademetsien määrä on laskenut nykyiselle, noin 6–8 Mkm²:n tasolle (ks. Koskela ym. 2000, Lamb ym. 2005). Systemaattisena hävityksen voi sanoa kuitenkin alkaneen vasta 1970-luvun alkupuolella "Trans-Amazonia"-valtatien ja vastaavien tiehankkeiden toteuduttua, mikä mahdollisti uudisasutusryntäyksen ja alueiden laajamittaisen hyödyntämisen. Tämän jälkeen, nyt jo runsaan 30 vuoden ajan, sademetsää onkin voitu lähes pidäkkeittä kaataa, polttaa ja raivata viljelykseen, laiduntamiseen, sekä vastaamaan puun kasvavaa kysyntää. Viime vuosina hävitystä ovat vielä vauhdittaneet kasvava soijan viljely ja alkoholin tuottaminen biopoltoaineksi. Kehitys on ollut samantapaista muuallakin tropiikissa. Sademetsäalan romahdus lieneekin toteutunut pääosin niinä kolmena viime vuosikymmenenä, jolloin myös ilmasto on lämmennyt nopeasti. Vaikka luvut vaativat varmennuksen tilastovertailuin, sademetsien alan romahdus 30 vuoden aikana on saattanut olla 30–40 %, kun hiilidioksidin nousu samana aikana on ollut 13–14 %.

Sademetsät ovat kiinnostaneet ilmastotutkimusta lähinnä hiilidioksidin nieluina ja tuottajina. Kasvihuonepäästöistä lähes viidesosa voikin olla peräisin sademetsäalueilta. Toisaalta yhteyttä on tutkittu myös oletuksien, että ilmastovaikutukset olisivat suoria. Menetelmänä on käytetty *simulointia yleisen kierto liikkeen globaalisilla ilmastomalleilla*, joiden avulla on voitu jäljittää lämpömuutosten ohella haihdutusta, pilvisyyttä, sateita, kuivumista ja mahdollisia kaukovaikutuksia nopeutetussa aikataulussa. Jopa vuosikymmenien ajanjaksot kattavissa simulaatioissa laajojen metsäalojen täydellinen hävittäminen on johtanut tyypillisesti 1–2 asteen alueelliseen lämpenemiseen ja sateiden vähenemiseen – ja joskus myös kaukovaikutuksiin. Samantasoista lämpenemistä on myös voitu mitata toteutuneen

metsätuhon jälkeen (*Costa ja Foley 2000, Fedde-
ma ym. 2005, Gibbard ym. 2005, Koivisto ym. 2000,
Moorcraft 2003, Zeng ym. 1996*). Simulaatioista laa-
jimmissa (*Gedney ja Valdes 2000*) laskettiin, että
Amazonian sademetsien täydellinen hävittämi-
nen 12 vuoden aikana tulisi nostamaan paikal-
lista lämpötilaa 1,3^o C, samalla kun haihdutus
ja sateet vähenisivät. Alueellinen lämpövaikutus
olisi samaa tasoa kuin ennusteissa hiilidioksidi-
tasojen kaksinkertaistumisesta (4 W/m²). Lisäksi
laskelmat ennustivat, että latenttia lämpöä siirtyi-
si kaukovaikutuksena edellä mainitun ilmavirtau-
ksen, Rossbyn aallon, mukana sateiksi talviselle
pohjoisatlantilaiselle alueelle.

Silti vain muutama tutkija uskoo sademetsi-
en tuhon ratkaisevasti edistyneen ilmaston läm-
penemistä (*Costa ja Foley 2000, Pielke 2001, 2002*)
muutoin kuin ilmakehän hiilidioksidin lisääjänä.
Lasketut watit ja lämpöasteet eivät tähän riittäi-
si. Epäilyksiä on herättänyt etenkin sademetsien
kattaman alueen vähäinen koko, vain noin puoli-
toista prosenttia maapallon pinta-alasta. Kuiten-
kin tuhottu ala on 6–8 miljoonaa neliökilometriä
(ks. *Koskela ym. 2000, Lamb ym. 2005*) ja tuhon
ilmastollinen merkitys riippuu paitsi lämpe-
nemisen tasosta myös kaukovaikutuksista (*Ged-
ney ja Valdes 2000*). Käytetyissä ilmastomalleissa
on myös ollut suuria puutteita, mitä kertoo esi-
merkiksi tropiikin lämpötaseen laskeminen 3–4
kertaa liian pieneksi (*Wielicki ym. 2002*). Onkin
ilmeistä, että simulaatioihin ei ole vielä löydet-
ty kaikkia tarvittavia parametrejä ja painotuk-
sia. Toisaalta ilmaston lämpeneminen, kuivuus
ja metsäpalot tehostavat sademetsien hävitystä
(*Hutyra ym. 2005*), joten myös syiden ja seuraus-
ten setviminen tuottaa päänvaivaa.

Samansuuntaiseen ja suurempaan vaikut-
ukseen viittaa sademetsien ”ilmastoiva poten-
tiaali”. Verrattaessa Amazonian alueen sade-
metsiä ruohikkopohjaiseen maastoon niiden
jäähdytysteho oli kosteana, latenttina lämpönä
keskimäärin 15 W/m² ja lisäksi kuivana lämpö-
nä 3 W/m² sademetsän eduksi. Erityisen merkit-
tävää on, että *kuivana kautena* ero kasvoi peräti
tasolle 70 W/m² (*Osborne ym. 2004*). Tutkijat to-
teavatkin, että sademetsäalue pystyy paitsi yl-
läpitämään omaa ilmastoaan, myös edistämään
ympäristönsä selviämistä kuivan kauden ylitse.
Vastaavasti on havaittu, että kuivana kautena
lämmön konvektiivinen nousu vähenee savan-
nin ja tuhotun sademetsän, mutta ei sademetsän
yläpuolella (*Machado ym. 2004*). Erot ovat olleet
johdonmukaisia ja samansuuntaisia myös sil-
loin, kun on verrattu erilaisia sademetsäalueita
laidunalueisiin (*Fisch ym. 2004*) sekä eri asteises-

ti tuhoutuneita vuoristojen sademetsiä (*pilvi-
metsiä*) toisiinsa (*Ray ym. 2006, Lawton ym. 2001,
Pielke 2002*).

Sademetsien suora ”ilmastoiva vaikutus”
saattaakin olla olennaisesti suurempi kuin mi-
hin vallitseva, pääasiassa hiilidioksiditasoihin
ja maaston albedovaikutuksiin keskittyvä tutki-
mus on päätyntä. Jäähdytyksen merkitystä kas-
vattaa myös sademetsien sijainti ilmastollisella
päiväntasaajalla, jonka ”logistiikkaan” kuuluu
ottaa vastaan auringon polttavin lämpö ja huo-
lehtia sen siirtämisestä muille leveysasteille ja
avaruuteen. ”Tropiikin lämpökoneen” suuret
ukkospilvet vaeltavat vuodenaikojen mukana
etelään ja pohjoiseen, aina joiltain osin sademet-
säalueen yläpuolella pystyen tämän takia aina
hyödyntämään mantereellista konvektiota. Vaik-
ka ukkospilvet peittäisivät vain prosentin verran
maapallon pinnasta, merkitsee tämä alana viittä
miljoonaa km² eikä toiminnan ”tuuletuskanavi-
na” voi olettaa tilaa enempää vaativan. Vastaa-
vasti, jos arvioimme sademetsien alaksi 7 Mkm²
ja niiden kuivan kauden aikaiseksi ”ylimääräi-
seksi” jäähdytyskapasiteetiksi Osbornen ryhmän
esittämän 70 W/m² päästäisiin alueellisesti hy-
vinkin jäähdytysvaikutukseen. Vaikka maasto-
vertailun tulos saattavat olla ylioptimistisia, ovat
lämpenemisiongelmat vain muutamia watteja neli-
ometriä kohden.

Ollakseen merkittävä vaikuttaja sademetsi-
en tuhon ei tarvitsisi selittää suoraan kuin osa
lämpenemisestä, sillä vaikutuksen voi odottaa
vahvistuvan kasvihuoneprosessissa positiivisten
palautteiden voimasta. Näinhän hiilidioksin
vähäisen lämpövaikutuksen oletetaan monin-
kertaistuvan vesihöyryn, pilvien ja alueellisen
kuivumisen potentoimana (näkemyksestä riip-
puen 3–10-kertaisesti). Samaa kertomataulua
olisi tietysti sovellettava myös muihin ilmas-
toa lämmittäviin tekijöihin. Sademetsien tuhon
tuottama 1–2 asteen lämmön nousu voi olla ai-
van liian pieni, jos käytetyt ilmastomallit ovat
aliarvioineet lämpömuutoksia yhtä paljon kuin
tropiikin lämpötasetta mitattasessa. Lisää ”jääh-
dytyskapasiteettia” saadaan, jos mukaan otetaan
muut tropiikin metsäalat, joita on pelkästään kos-
teita *kausivihantina metsinä* noin 5–6 Mkm² (*Koske-
la ym. 2000*). Brasiliassa lämpötilat ovat metsien
yläpuolella metsätyyppäjä erottelematta 2–3 as-
tetta matalampia kuin laidunalueilla. Oman lu-
kunsa muodostavat sademetsien tilalle *kestävän
kehityksen nimissä istutetut eukalyptus-, kumi- ja
muut tuotantometsät*, joiden toivotaan säilyttävän
alueen luonnonmukaisuutta. Kuinka hyvin nämä
korvaisivat menetettyjen sademetsien il-

mastovaikutuksia lienee kuitenkin selvittämättä. Kokonaiskuvaa metsien jäähdytyspotentiaalista voivat hämmentää tiedot *korkeampien leveysasteiden metsien ilmasta lämmittävistä vaikutuksista* (Feddemä ym. 2005, Gibbard ym. 2005). Ristiriita voi kuitenkin olla näennäinen. Eräs vaikuttava tekijä on metsien lämpöä sitova ja auringon lämpösäteilyä vain vähän heijastava vaikutus. Eroja voisi selittää myös kosteus ja pilvet, joiden vaikutuksissa on samaa, leveysasteen mukaista vastakkaisuutta.

Metsätuhot liittyvät yleisempiin maankäytön muutoksiin, joita on laskettu toteutuneen pelkääntään laidunmaiksi noin 30 miljoonaa neliökilometriä. Lisäksi mukaan on laskettava kaupunkien kivierämaiden suuri lämpövaikutus ("urban heat islands") ja muut kulttuuriin liittyvät paikalliseen ilmastoon vaikuttavat tekijät (Pielke ym. 2002). Pielke arvioikin maankäytön muutosten ilmastolliset seuraukset "ainakin yhtä suuriksi kuin kasvihuonekaasujen lämmittävä vaikutus".

Ukkospilvet tuuletuskanavina

Cumulonimbuspilvet jäähdyttävät tropiikkia nostamalla lämmintä, kosteaa ilmamassaa ilmakehän yläosaan ja edelleen Hadleyn kierron mukana viileämmille leveysasteille ja lopulta navoilte asti. Tämänkin voi sanoa olevan tuuletusta, vaikka suuri osa lämmöstä vain tasaantuu vyöhykkeiden välillä poistumatta varsinaisesta ilmakehästä, troposfääristä. Korkealle nouseva lämpö voi myös helpommin säteillä tai siirtyä pois ilmakehästä. Koska suurimmat ukkospilvet kohoavat stratosfääriin asti, on syytä arvioida voisivatko ne toimia myös "todellisina" tuuletuskanavina, kasvihuoneemme tarpeen mukaan aukeavina kattoikkunoina.

Stratosfääriin tiedetään nousevan kaasuja, lämpöä ja hiukkasia. Korkeimmista ukkospilvitorneista voi kohota "pullistumia" (*overshooting top*) "ruiskeita" (*injection*) tai "suihkulähteitä" (*fountain*), jotka purkavat stratosfääriin lämpöä, kaasuja ja hiukkasia esimerkiksi suurten metsäpalojen yhteydessä (ks. Stohl ym. 2003). Avaimena on mantereellinen konvektio, sillä vain maa-alueiden ylle kohoavat pilvitornit pystyvät vuorovaikutukseen stratosfääriin kanssa (Ricaud ym. 2007). Tämä toteutuu pilvitornin hattuna olevan cirruspilven läpi. Ukkospilvi voi tuottaa cirruksia enemmänkin (*detrainment*) ja näilläkin voi olla omaa vuorovaikutusta, joka lämmittää stratosfääriin alaosaa. Jopa kokonainen cirruspilvi voi nousta stratosfääriin (Corti ym. 2006).

Konvektion jatkumista stratosfääriin rajoittaa nousuvirtauksen kääntyminen troposfääriin ja stratosfääriin rajalla (*tropopaussi*) vaakatasoon. Konvektiossa lämmön nousun edellytyksenä on kosteuden jatkuva kondensoituminen vesipisaroiksi (pilvet, sateet), ja samaan tapaan kondensaatio avaa tietä myös stratosfääriin. Tropopaussi on huomattavasti troposfääriä kuivempi (vettä 3–5 ppm/vol) ja kylmempi (luokkaa –55° C), minkä vuoksi nouseva ilmvirtaus joutuu kuin kylmäsokkiin, joka rutistaa siitä "viimeisenkin" vesipisaran (*freeze-drying*). Stratosfääriissä, suoraan ilmastollisen päiväntasaajan ukkospilvi-vyöhykkeen yläpuolelta saa alkunsa *Brewerin ja Dobsonin kiertoliikkeenä* tunnettu virtaus, joka levittää nousevia kaasuja, energiaa ja ainetta stratosfääriin sisällä, mutta voi purkaa myös kylmää ohutta ilmaa ja jääkiteitä alaspäin. Kiertoliike on hidas, mutta stratosfääriin tulevan materiaalin leviäminen laajalle alalle mahdollistaa periaatteessa suuretkin volyymit.

Konvektiossa nousevilla kaasulla, hiukkasilla ja lämmöllä voi siten sanoa olevan edellytykset päästä stratosfääriin, mutta riittäisikö tämä myös globaalisesti merkittävään "tuuletukseen"? Tietoa konvektiossa stratosfääriin nousevan ilman lämmön volyymeistä ei näytä olevan tarjolla, ja tutkijoita ovatkin kiinnostaneet ennen kaikkea konvektion kineettinen energia sekä nousevien hiukkasten ja saasteiden määrät.

Epäsuorasti suurtenkin lämpö- ja ilmamäärien nousuun voivat viitata eräät ilmastomuutokseen liittyvät yleiset trendit. (1) *Troposfääriin lämmitessä stratosfääri jäähtyy*. Tätä ei ole voitu kiistatta osoittaa vain kasvihuonekaasujen tai ilmaston lämpenemisen vaikutukseksi. Muun muassa kosteuden muutoksilla ja otsonitasojen vähenemisellä katsotaan olevan merkitystä. Olettaen, että konvektio jäähdyttää troposfääriä nostamalla lämpöä stratosfääriin, konvektion heikkenemisen odottaisi johtavan stratosfääriin jäähtymiseen. Tähän voisi vaikuttaa kaasujen, molekyylien ja hiukkasten niukkuudesta seuraava lämpösäteilijöiden lasku. (2) *Stratosfääriin kosteus vähenee*. Tiedot ovat osin ristiriitaisia, mutta ainakin vuodesta 2001 lähtien kosteus on selvästi vähentynyt suhteessa otsonimuutoksiin, mitä voi selittää Brewer–Dobson kiertoliikkeen lisääntynyt aktiivisuus (Randel ym. 2006). Kosteus riippuu stratosfääriin nousevan ilman määrästä ja tässä mantereellista konvektiota voi pitää hyvinkin mahdollisena vaikuttajana. (3) *Stratosfääriin otsonikerroksen oheneminen* on kytketty halogeeniyhdisteiden (CFC), metaanin, vapaiden radikaalien ja kosteuden lisääntymiseen. Kuitenkin

otsonitasot muuttuvat myös näistä tekijöistä riippumatta ja eräs ”syyllinen” saattaisi olla vähentynyt konvektio. Otoni muodostuu hapestä ja konvektiossa nousevan ilman odottaisi lisäävän stratosfääriin hapen määrää. Ukkospilven yläosassa konvektion tuoma ilma todellakin lisääkin otsoninmuotostusta, mutta stratosfääristä alaspäin purkautuvan ilman vaikutus on huomattavasti suurempi. Reaktioihin vaikuttavat ukkospilven sähköiset ilmiöt (*Winterrath ym.* 1999). Kysymys, voisivatko ilmaston lämpeneminen, stratosfääriin jäähtyminen ja samaan aikaan kehittynyt otsonikato johtua samasta yhteisestä syystä, jää testattavaksi. Pääehdokaas tähän hypoteettiseen kehitykseen on mantereellisen konvektion väheneminen. Tiedetään, että suurin osa stratosfääriin otsonista muodostuu ilmastollisen päiväntasaajan kohdalla, siis konvektiota ylläpitävän ukkospilvivyöhykkeen yläpuolella.

Hiilidioksidin asema

Jotta hiilidioksidi voisi olla lämpenemisen syy, sen avulla pitäisi voida selittää myös alueelliset ja ilmaston luonnollisiin vuorovaikutuksiin liittyvät ilmiöt ja muutokset (*Corti ym.* 1999). Tätä ei artikkelini kyseenalaista, mutta vihjaa, että selitettävää riittää. Onhan ihmetelty, miten ilmakehään tasaisesti jakautuva hiilidioksidi voi tuottaa alueellisesti hyvin poikkeavia ja rajujakin ilmastollisia muutoksia esimerkiksi tropiikissa ja pohjoisilla vyöhykkeillä. *Cai* (1999) laskee, että pohjoisten alueiden voimakasta lämpenemistä ei voida selittää vain kasvihuonekaasujen varassa, ilman tropiikista tulevaa lisälämpöä. Kuten edellä todettiin, pohjoisatlanttisen alueen lämpeneminen on mahdollista liittää kaukovaikutuksiin, jotka tulevat trooppisilta meriltä (*Hurrell* 1996, *Hoerling ym* 2000, *Rodwell ja Folland* 2002), sademetsien tuhoalueilta (*Gedney ja Valdes* 2000) sekä Hadleyn kierron välityksellä yleisesti tropiikista (*Chen ym.* 2002). Trooppisten vesien lämpeneminen sekä kasvava merellinen konvektio antavat perustaa tämän kaltaisille ilmiöille ja merialueiden ukkospilvet voivat myös riehaantua trooppiseksi myrskyiksi ja hurrikaaneiksi. Sen sijaan on vaikeampi ymmärtää miten kaikkialla maailmassa ilmakehään tasaisesti jakautuva hiilidioksidi saisi aikaan tropiikissa havaitun kehityksen. Miten kaasun yhden watin/m² suuruusluokkaa oleva lämpövaikutus ylipäänsä olisi järkevässä vuorovaikutussuhteessa yli kilowatin/m² teholla paahtavaan tropiikin aurinkoon? Tähän on vastattu, että ylimääräinen lämpö voidaan kuljettaa,

heijastaa ja säteillä pois, mutta kasvihuonekaasujen muodostamaan ”loukkuun” jäänyt lämpö sitoo kosteuden ja siten edistää pilvettömyyttä ja kuivumista. Selitys sivuuttaa konvektion, jossa lämmön mukana nousevaa kosteutta kierrätetään ja se sataa takaisin maahan. Lämpö pääsee poistumaan, jos se nousee ajoissa tarpeeksi korkealle ja cirrusmuodostus estää auringon suoraa vaikutusta. Esimerkiksi kuivumiskehitys sademetsissä (*Hutyra ym.* 2005) voisi selittyä tropiikin omin mekanismein paremmin hiilidioksidin vaikutuksena. Siten häiriöt tropiikissa voisivat aiheuttaa lämpenemistä muilla leveysasteilla ja näin täyttää joitain *Cortin* (1999) ilmastonmuutoksen aiheuttajalle asettamista vaatimuksista.

Vihjeen mantereelliseen konvektioon perustuvan ilmastollisen säätelyn selityskyvystä saatetaan antaa niin sanottu heikosti loistavan tai *heikon auringon paradoksi* (*faint sun paradox*). Tämän mukaan auringon lämpövaikutus on ollut maapallon alkuaikoina vain noin 70 prosenttia nykyisestä. Planeettamme olisi täytynyt tuolloin olla paksun jään peitossa ja keskilämpötilojen 15 astetta pakkasen puolella. Fossiili- ja muut tiedot kuitenkin kertovat vapaasti lainehitivista vesistä ja hyvinkin siedettävistä lämpötiloista. Keskilämpö on ollut peräti 25 astetta korkeammalla kuin mihin auringosta tuleva lyhytaaltainen säteily antoi edellytykset. Ristiriitaa ei ole pystytty selittämään hiilidioksidin avulla. Tuore hypoteesi esittää syyksi tuolloin vielä nuoren aurinkomme suuremman hiukkasaktiivisuuden, jonka vaikutusta kasvihuonekaasut ja mahdolliset biologiset tekijät ovat voineet täydentää (*Shaviv* 2003). Käsillä olevan konvektiohypoteesin mukaan selityksenä voisi olla mantereellisen konvektion vähäisyys. Planeettamme varhaisvaiheissa maa-alueet olivat elotonta aavikkoa, jolloin ne eivät olisi voineet kasvillisuuden puuttuessa tukea mantereellista konvektiota. Lämmön tasauksen ja poiston olisi täytynyt rajoittua (säteilyn ohella) merelliseen konvektioon, jolloin lämpöä olisi täytynyt jäädä talteen paljon enemmän kuin nykyisin. Mantereellinen konvektio olisi päässyt kehittymään vasta kasvillisuuden ilmaantuessa maan päälle. Ajatus on spekulatiivinen, mutta sitä saattavat tukea fossiilitiedot toisesta suuresta luokan ilmiöstä, joka ajoittuu kambrikauteen. Kysymys on 542 miljoonaa vuotta sitten tapahtuneesta mullistuksesta nimeltään ”kambrinen räjähdys” (*Cambric explosion* tai *Biological Big Bang*). Tätä edeltävä ilmasto oli huomattavasti lämpimämpi kuin nykyään, elämä oli vähäistä eikä ollut vielä noussut maan päälle. Sitten, geologisesti katsoen varsin nopeasti, 40 miljoonan vuoden kuluessa, kehi-

tys nosti biomassan noin 300 miljoonaan gigatonniin ja ilmasto jäähtyi suunnilleen nykyiselle tasolle. Kambrisen räjähdysen alkusyytä ei tiedetä, mutta siihen liittyi suuria muutoksia mantereiden muodoissa ja rakenteissa, silikaattien ja hiilidioksidin tasoissa sekä sitomisessa; myös ilmakehän happipitoisuus kasvoi voimakkaasti. Jäähtyminen tuki biosfäärin kasvua, mutta yhtä ilmeisesti, vastavuoroisesti ja suurella voimalla kasvillisuus näytti edistäneen lämpötilojen laskua (*Bloch ym.* 2003). On houkuttelevaa ajatella että elävän, kosteutta sitovan ja vettä kierrättävän biomassan kasvu olisi voinut olla juuri tarvittava tekijä mantereellisen konvektion ja siihen perustuvan jäähtymisen kehittymiselle. Hiilidioksidia kului biomassan tuottamiseen, mutta nimenomaan kasvillisuuden katsottiin aktiivisesti tukeneen lämpötilojen laskua.

Myös hiilidioksidin ja ilmaston vuorovaikutus saattaisi toteutua kasvillisuuden kautta. Korkea lämpötila lisäisi hiilidioksiditasoja, mikä edistäisi kasvillisuuden kasvua ja pitkällä aikavälillä jäähtymistä. Hiilidioksidin tulkitseminen jäähtyttäväksi, vaikkakin vain pitkällä aikavälillä, voi kuulostaa kummalliselta. Tämän suuntainen vuorovaikutus ja kausaalisuus tekisivät kuitenkin ymmärrettäväksi hiilidioksiditasojen ja lämpötilojen rinnakkaisen ja läheisen kehityksen satojen tuhansien vuosien aikana. Lämpötiloja ei heiluttelisi hiilidioksidi sinänsä vaan hiilidioksidista yhteytyksessä vapautuvasta hiilestä kehittyvä biosfääri, mikä ei sulje pois kaasumuotoisen hiilidioksidin pientä lämmittävää vaikutusta. Pääkysymys olisi kuitenkin se, että hiilidioksidista yhteytyksen kautta muodostuva, ilmaston säätelemiseen osallistuva biomassaa saattaisi nyt olla romahtamassa tropiikissa. Ajatuskulkua saattaa tukea suomalaisen tutkimusryhmän havainto, että osa hiilidioksidista yhteytyksessä vapautuvasta hiilestä muuttuu aerosoleiksi ja voi siten edistää jäähtymistä (*Kulmala ym.* 2003).

Kulttuurien harjoittama itsetuho

Lähes kaikkialle, minne ihminen on vaeltanut tai asettunut asumaan hän on ensi töikseen aloittanut metsän tuhoamisen, kunnes alue, valtakunta tai "puoli maanosaa" on muuttunut hiekka- tai kivierämaaksi. Kaskeaminen, peltonraivaus, asumukset, julkinen rakentaminen, laivastojen kehittäminen sekä metallien ja tiilien valmistus ovat nielleet loputtomasti puuta. Pääsäässaaret ja mayakulttuuri ovat äärimmäisiä

esimerkkejä metsien hävittämisestä, joka päättyi ilmastomuutokseen ja kulttuuriin häviämiseen (*Diamond* 2005). Koko valtava alue Saharan länsiosista Vähä-Aasian kultaisen puolikuun kautta Mesopotamiaan ja aina Indukselle saakka on ollut vehreiden metsien peittämää hedelmällistä vyöhykettä, joka antoi perustan suurille varhaisille kulttuureille mutta joka metsien hävittyä on muuttunut ruohotupsuja kasvaviksi laitumiksi ja osin autiomaiksi.

Ihmisen aivan ilmeisestä osuudesta huolimatta tiede ei ole pystynyt osoittamaan metsätuhojen yhteyttä ilmastomuutoksiin, ja ne on jouduttu tulkitsemaan jonkin globaalisesti vaikuttavan ilmiön aiheuttamiksi. Hiilidioksidia on tarjottu ratkaisuksi, mutta muinaisissa energian käytön mittasuhteissa selitys ei ole edes järkevä. Sen sijaan mantereellisen konvektion ja siihen liittyvän kosteuden ja jäähtymisen alueittainen romahtaminen voisi kantaa pidemmälle. Edellä on käsitelty pääasiassa tropiikin ilmiöitä ja niistä mahdollisesti kumpuavia globaalisia trendejä, mutta konvektio toimii periaatteessa kaikkialla ja erilaisissa mittasuhteissa. Metsämaaston raivaaminen laitumiksi, golfkentiksi, teiksi ja kaupungeiksi voi hävittää kosteuden sekä konvektion suosiman alueellisen matalapaineen ukkossateineen, jolloin kosteuden ylläpito riippuu ulkopuolelta, sattuman oikuista tulevista sateista.

Mennäänkö metsään?

Konvektion merkityksen avautuminen on ollut vaiherikas ja ristiriitojakin sisältänyt prosessi. Cumulonimbuspilvien toimintaperiaatteet ensiksi oivaltanut ja selvittänyt Joanne Simpson (s. 1923) törmäsi urallaan monen tasoihin esteisiin. Se, että hän oli määrätietoinen ja rohkea nainen, joka oli ensimmäinen ilmastotieteilijäksi kouluttautunut, sulki ovia. Lentokoneen saaminen suurten ukkospilvien tutkimiseksi "sisältä käsin" osoittautui käsittämättömän suureksi ongelmaksi. Hänen selityksensä ukkospilvien ("hot tower") toiminnasta kuitenkin omaksuttiin nopeasti ja myös ukkospilvien muuttuminen trooppisiksi myrskyiksi ja hurrikaaneiksi kelpasi tiedeyhteisölle. Sen sijaan lähes vihamielisiä reaktioita herätti väite, että pienhiukkasilla voitaisiin kasvattaa pilvitornien kokoa tai taltuttaa hurrikaaneja, ja näkemys mantereellisen konvektion poikkeuksellisen suuresta merkityksestä melkein onnistuttiin vaikenemaan kuoliaaksi. Kaikesta huolimatta Simpson on ollut jo vuosikymmeniä kunnioitettu ja palkittu tiedenainen ja osallistu-

nut tutkimukseen viime vuosiin asti.

Tänään ongelmia näyttää olevan muilla aivan sukupuoleen katsomatta. Maaston muutosten ilmastovaikutuksia ehkä eniten selvitetty Roger Pielke valittaa valtaviirran taholta tulevaa alueensa vähättelyä. Vielä tämän vuoden Kansainvälisen ilmastotutkimuksen ja seurannan paneelin raportissa (IPCC 2007) kysymykselle ei hänen mukaansa annettu sen tarvitsemaa tilaa. Pielken reaktioissa on nähtävissä turhautumista, ja hän on varmaan myös ärsyttänyt tiedeyhteisöä puhumalla ”suurista laiminlyönneistä”, miten ”tutkimus ajaa teoriasta ohitse” tai ”vaihtoehtoista hiilidioksidille”. Syitä kiinnostuksen puutteeseen voi olla siinäkin, että hän ja muut aiheeseen syventyneet eivät ole koonneet näkemyksiään yhtenäisiksi malleiksi, joita voisi testata. Toisaalta useimmat tässäkin kirjoituksessa esitetyt kohdat ja ilmiöt ovat olleet käytetyissä ilmastomalleissa jo pitkän aikaa mukana, joten väitettyjen vaikutusten ”olisi odottanut tulleen ilmi”. Tämä ei ole kuitenkaan itsestään selvä asia, sillä ilmastomallien verkkojen silmäkoot näyttävät olevan konvektiovirtausten havaitsemiseen liian suuria, ja parempia malleja on vasta alettu kehittää (Garner ym. 2007).

Tämä kirjoitus on tutkivan journalistin yritys hahmottaa kokonaisuutta, ja ennemmin kuin tarjota vastauksia artikkeliin tehtävänä on nostaa esiin kysymyksiä ja testattavia näkökulmia. Palaute on tervetullutta. Kiitän akatemiaprofessori Markku Kulmalaa, dosentti Jouni Räisästä ja dosentti Markku Simulaa käsikirjoituksen lukemisesta ja kommentoinnista.

KIRJALLISUUS

- Bader, J., & Latif, M. (2003): The impact of decadal-scale Indian Ocean sea surface temperature anomalies on Sahelian rainfall and the North Atlantic Oscillation. *Geophysical Research Letters*, 30:GLO18426, CLM7.
- Bloh, W. von, Bounama, C., & Franck, S. (2003): Cambrian explosion triggered by geosphere-biosphere interaction. *Geophysical Research Letters*, 30:1963, GLO17928:1-5.
- Cai, M. (2005): Dynamical amplification of polar warming. *Geophysical Research Letters*, 32:24481.
- Cess R. D., Zhang, M., Wielicki, B. A., Young, D. F. (2001): The influence of the 1998 El Niño upon cloud-radiative forcing over the Pacific warm pool. *Journal of Climate*, 14:2129-2137.
- Charlson, R. J., Lovelock, J.E., Andreae, M. O., & Warren S.G. (1987): Oceanic phytoplankton, atmospheric sulphur, cloud albedo and climate. *Nature*, 326:655-661.
- Charney, J.G. (1975): Dynamics of deserts and drought in the sahel. *Quarterly journal of the Royal meteorological Society*, 101:193-202.

- Chen, J., Carlson, B. E., & Del Genio, A. D. (2002): Evidence for strengthening of the tropical general circulation in the 1990s. *Science* 295:838-841.
- Corti, S., Molteni, F., & Palmer, T. N. (1999): Signature of recent climate change in frequencies of natural atmospheric circulation regimes. *Nature*, 398:799-802.
- Corti, T., Luo, B.P., Fu, Q., Vömel, H., & Peter T. (2006): The impact of cirrus clouds on tropical troposphere-to-stratosphere transport. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 6:25392547
- Costa, M.H., & Foley, J. (2000): Combined effects of deforestation and doubled atmosphere CO2 concentration on the climate of Amazonia. *Journal of Climate*, 3:18-24
- Diamond, J. (2005): *Romahdus. Miten yhteiskunnat päättävät tuhoutua tai menestyä*. TERRA COGNITA, Hakapaino, Helsinki.
- Feddema, J. J., Oleson, K. W., Bonan, G. B., Mearns, L. O., Buja, L. E., & Meehl, G. A., Washington W. M. (2005): The importance of land-cover change in simulating future climates. *Science*, 310:1674-1678.
- Fisch, G., Tota, J., Machado, L. A. T., Silva Dias, M. A. F., da F Lyra, R. F., Nobre, C. A., Dolman, A. J., Culf, A. D., Halverson, J., & Fuentes, J.D. (2004): *Theoretical and Applied Climatology*, 78:47-59.
- Garner, S. T., Frierson, D. M. W., Held, I. M., Pauluis, O., Vallis, G. K. (2007): Resolving convection in a global hydrostatic model. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 64:2061-275.
- Gedney, N., & Valdes, P. (2000): The effect of Amazonian deforestation on the northern hemisphere circulation and climate. *Geophysical Research Letters*, 27;19:3053-3056.
- Gibbard, S., Caldeira, K., Bala, G., Phillips, T. J., & Wickett, M. (2005): Climate effects of global land cover change. *Geophysical Research Letters*, 32:L23705.
- Gray, W.M. (1973): Cumulus convection and larger scale circulations I. Broad-scale and mesoscale considerations. *Monthly Weather Review*, 101:839-855.
- Guan, S., & Reuter, G. W. (1995): Numerical simulation of a rain shower affected by waste energy released from a cooling tower complex in a calm environment. *Journal of Applied Meteorology*,
- Hartmann, D. L. (2002) Tropical surprises. *Science*, 295;811-812.
- Hartmann, D. L., & Michelsen, M. L. (2002): No evidence for iris. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 249-255.
- Hoerling, P., Hurrell, J.W., & Xu T. (2001): Tropical origins for recent North Atlantic climate change. *Science*, 292:90-92.
- Houze, R. A. Jr. (2004): Mesoscale convective systems. *Reviews of Geophysics*, 42:RG4003,1-43.
- Hurrell, J.W. (1996): Influence of variations in extratropical wintertime teleconnections on northern hemisphere temperature. *Geophysical Research Letters*, 23:665-668.
- Hutyra, L. R., Munger, J. W., Nobre, C. A., Saleska, S. R., & Vieira, S. A. (2005): Climatic variability and vegetation vulnerability in Amazonia. *Geophysical Research Letters*, 32:L24712, 1-4.
- IPCC (2007): The Intergovernmental Panel on Climate Change. *Report*, 28.4.2007.
- Koskela, J., Nygren, P., Berninger, F., & Luukkanen, O. (2000) *Tropical Forestry Report 22*. University of Helsinki, 2000.

- Krejci, R., Ström, J., De Reus, M., & Sahle, W. (2005): Single particle analysis of the accumulation mode aerosol over the northeast Amazonian tropical rain forest, Surinam, South America. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 5:3331-3344.
- Kulmala, M., Suni, T., Lehtinen, K. E. J., Dal Maso, M., Boy, M., Reissell, A., Rannick, U., Aalto, P., Keronen, P., Hakola, H., Bäck, J., Hoffmann, T., Vesala, T., & Hari, P. (2003): A new feedback mechanism linking forests, aerosols, and climate. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions* 3:6093-6107.
- Kulmala, M., Hämeri, K., Aalto, P. P., Mäkelä, J. M., Pirjola, L., Nilsson, E. Douglas, et al. (2001). Overview of the international project on biogenic aerosol formation in the boreal forest. *Tellus*, 53B:324-343.
- Kump, L. R. (2002): Reducing uncertainty about carbon dioxide as a climate driver. *Nature*, 419:188-190.
- Lamb, D., Erskine, P. D., & Parrotta, J. A. (2005): Restoration of degraded tropical forest landscapes. *Science*, 310:1628-1632.
- Lawton, R. O., Nair, U. S., Pielke, R. A. Sr., & Welch, R. M. (2001): Climatic impact of tropical lowland deforestation on nearby montane cloud forests. *Science*, 294:584-587.
- Lindzen, R. S., Chou, M.-D., & Hou, A. (2001): Does the earth have an adaptive infrared iris? *Bulletin of the American Meteorological Society*, 82:417-32.
- Machado, L. A. T., Laurent, H., Dessay, N., & Miranda, I. (2004): Seasonal and diurnal variability of convection over the amazonia: A comparison of different vegetation types and large scale forcing. *Theoretical and Applied Climatology*, 78:61-67.
- O'Dowd, C. D., Aalto, P., Hämeri, K., Kulmala, M., & Hoffmann Th. (2002): Atmospheric particles from organic vapours. *Nature* 416:497-8.
- Osborne, T.M., Lawrence, D.M., Slingo, J.M., Challenor, A.J., & Wheeler, T.R. (2004): Influence of vegetation on the local climate and hydrology in the tropics: sensitivity to soil parameters. *Climate Dynamics*, 23:45-61.
- Otterman, J. (1974): Baring High-albedo soils by overgrazing; A hypothesized desertification mechanism. *Science*, 186:531-533.
- Pielke, R. A., Sr. (2001): Influence of the spatial distribution of vegetation and soils on the prediction of cumulus convective rainfall. *Reviews of Geophysics*, 39:151-177.
- Pielke, R. A., Sr. (2002): Overlooked issues in the U.S. National climate and IPCC assessments (editorial). *Climate Change*, 52:1-11
- Pielke, R. A, Sr.(2005): Land use and climate change. *Science*, 2005;310:1625-1626.
- Pielke, R. A, Sr, Marland, G., Betts, R. A., Chase, T. N., Eastman, J. L., Niles, J. O., Niyogi, D. S., & Running, S. W. (2002): The influence of land use and landscape dynamics on the climate system: relevance to climate-change policy beyond the radiative effect of greenhouse gases. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, A*, 360:1705-1719.
- Pierrehumbert, R. T. (2000) Climate change and the tropical pacific: The sleeping dragon wakes. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 97:1355-1358.
- Ramanathan, V., & Collins, W. (1991):Thermodynamic regulation of ocean warming by cirrus clouds deduced from observations of the 1987 El Nino. *Nature*, 351:27-32.
- Randell, W. J., Wu, F., Vörmel, H., Nedoluha, G.E., & Forster, P. (2006): Decreases in stratospheric water vapor after 2001: Links to changes in the tropical tropopause and the Brewer-Dobson circulation. *Journal of Geophysical Research*,111:D12312, 1-11.
- Ray, D. K., Nair, U.S., Lawton, R. O., & Welch, R. M. (2006): Impact of land use on Costa Rican tropical montane cloud forests: Sensitivity of orographic cloud formation to deforestation in the plains. *Journal of Geophysical Research*, 111:D02108, 1-16.
- Ricaud, P., Barret, B., Attié, J.-L., Le Flochmören, E., Motte, E., Teyssèdre, H., Peuch, V.-H., Livesey N., & Lambert A., Pommereau J.-P. (2007): Impact of land convection on troposphere-stratosphere exchange in the tropics. *Atmospheric and Chemical Physics Discussions*, 7:3269-3300.
- Rissler, J., Swietlicki, E., Zhou, J., Roberts, G., Andreae, M. O., Gatti, L.V., & Artaxo, P. (2004): Physical properties of the sub-micrometer aerosol over the Amazon rain forest during the wet-to-dry season transition – comparison of modeled and measured CCN concentrations. *Atmospheric and Chemical Physics*, 4:2119-2143.
- Rodwell, M. J. & Folland, C. K. (2002): Atlantic air-sea interaction and seasonal predictability. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 128:1413-1443.
- Shaviv, N. J. (2003): Towards a solution to the early faint sun paradox: a lower cosmic ray flux from a stronger solar wind. *Journal of Geophysical Research* 108:1437, doi:10.1029/2003 JA009997.
- Shaw, G. E., Benner, R. L., Cantrel, W. & Clarke, A. D. (1998): On the regulation of climate: A sulfate particle feedback loop involving deep convection. *Climate Change*, 39:23-33.
- Sherwood, S. C. (2002): Aerosols and ice particle size in tropical cumulonimbus. *Journal of Climate*, 15:1051-1063.
- Stohl, A., Bonasoni, P., Christofanelli, P., Collins, W., Feichter J., et al. (2003): Stratosphere-troposphere exchange: A review, and what we have learned from staccato. *Journal of Geophysical Research*, 108:D128516:1-15.
- Svensmark, H., & Friis-Christensen, E. (1997): Variation of cosmic ray flux and global cloud coverage – a missing link in solar-climate relationships. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 59:1225-1232.
- Wielicki, B., Wong, T., Allan, R. P., Slingo, A., Kiehl, J. T., Doden, B. J., Gordon, C. T., Miller, Alvin J., Yang, Shi-Keng, Randall, D. A., Robertson, F., Susskind, J., Jacobowitz Herbert. (2002): Evidence for large decadal variability in the tropical mean radiative energy budget. *Science*,
- Winerrath, T. J., Kurosu, T. P., Richter, A., Burrows, J. P. (1999) Enhanced O-3 and NO-2 in thunderstorm clouds: Convection or production? *Geophysical Research Letters*, 26:1291-1294.
- Zeng, N, & Neelin JD. (1999): A land-atmosphere interaction theory for the tropical deforestation problem. *Journal of Climate*, 12:857-872.

Kirjoittaja on terveydenhuollon lisensiaatti, joka on toiminut tutkijana lääketeollisuudessa ja vapaana tiedetoimittajana. (jouko.parantainen@pp.inet.fi)