

Door de bomen de bodem niet meer zien

L.A. Bruijnzeel

Rede uitgesproken bij de aanvaarding van het ambt van hoogleraar Landgebruik en Hydrologie aan de Faculteit der Aard- en Levenswetenschappen van de Vrije Universiteit Amsterdam op 18 december 2008.



vrije Universiteit

amsterdam

Door de bomen de bodem niet meer zien...

Mijnheer de Rector, collega's, familie en vrienden, en een ieder die deze plechtigheid met zijn of haar aanwezigheid opluistert,

Verschillenden onder u zullen zich wellicht afgevraagd hebben: 'Wat bezielt iemand die de "VUT-gerechtigde" leeftijd heeft bereikt om nog een dergelijke zware uitdaging aan te gaan, in plaats van zich te richten op een geleidelijk afbouwen van activiteiten en af te stevenen op een minder stressvol en comfortabeler bestaan?'. Een alleszins begrijpelijke overweging. Natuurlijk heb ik mijzelf deze vraag ook gesteld. Het antwoord luidt kort en goed: passie. Passie voor de hydrologie, passie voor (met name tropische) ecosystemen en hun bewoners – mensen, dieren en planten – maar bovenal een niet te negeren innerlijke drang om bij te dragen aan een beter beheer en gebruik van ecosystemen en landschappen. Die passie voor de wetenschap – die ik overigens deel met de meeste van mijn collega's – zorgt ervoor dat wij een hoge en soms excessieve werkdruk, regelmatig terugkerende bezuinigingen en een gestaag uitdijende universitaire regelgeving voor lief nemen. Dezelfde drijfveer maakt ook dat velen zich zelfs na het bereiken van de pensioengerechtigde leeftijd blijven verdiepen in hun geliefde vak, maar ik dwaal af...

Hoewel niet opgegroeid op een boerderij, stam ik zowel van vaders- als van moederszijde uit een boerengeslacht en verbondenheid met 'het land' is mij met de paplepel ingegoten. Niettemin was ik eind jaren zestig van plan om theologie te gaan studeren, voornamelijk om antwoord te krijgen op de grote vragen des levens – achteraf gezien een nogal naïeve gedachte. Gelukkig vroeg een jeugdvriend me in het voorjaar van 1969 om mee te gaan naar een voorlichtingsbijeenkomst over de studie Geologie aan de VU alwaar ik bij het zien van een dunne doorsnede van een gesteente onder een zogeheten polarisatiemicroscoop onmiddellijk 'om' ging en de theologie verder liet voor wat zij was.

Na drie jaar studie geologie loste ik een oude belofte aan mezelf in om 'overland' naar Afghanistan, India en Nepal te reizen. Tijdens die drie maanden durende tocht werd ik me bewust van het grote belang van water in droge gebieden en van de negatieve effecten van onverantwoord landgebruik, zoals verzilting van bodems door over-irrigatie in noord India,

geulerosie in overbegraasde gebieden in Pakistan, en aardverschuivingen op ontboste hellingen in Nepal. Mijn keuze voor de doctoraalstudie Hydrologie was gemaakt maar binnen twee jaar kwam ik voor een dilemma te staan. Het was in die tijd gebruikelijk om het doctoraalveldwerk uit te voeren in Portugal, een land wat begin zeventiger jaren nog bloedige koloniale oorlogen uitvocht in Mozambique en Angola. Mijn vrees was dat de gegevens die verzameld werden tijdens het veldwerk gebruikt zouden worden door de lokale overheden om de watervoorziening voor de toeristen te verbeteren en dat de inkomsten uit toerisme vervolgens hun weg zouden vinden richting het Portugese Ministerie van Oorlog. Gelukkig had mijn mentor en latere promotor professor Ben Engelen begrip voor mijn politieke bezwaren (in tegenstelling tot mijn toenmalige haardracht) en hij regelde een stage in het Java van generaal Soeharto die later dat jaar – we spreken 1975 – Oost-Timor zou binnenvallen. Bij terugkeer in Nederland werd ik dan ook tijdens een colloquium over mijn veldwerk stevig aangevallen door collega-studenten die beter geïnformeerd waren over de Indonesische situatie dan ik destijds in de Javaanse binnenlanden. Maar tijdens dat eerste tropische veldwerk in het dichtbevolkte en intensief gebruikte Serayu gebergte werd mijn belangstelling voor de ingewikkelde relaties tussen landgebruik en het hydrologisch functioneren van tropische landschappen definitief gewekt. Tegelijkertijd zag ik van dichtbij hoe veel mensen door armoede gedwongen waren om er landbouwpraktijken op na te houden waarvan ze zelf ook wel inzagen dat die niet vol te houden zouden zijn op de lange termijn.

Bossen: sponzen of pompen?

Traditioneel leveren hoger gelegen bosgebieden het water voor steden en irrigatiesystemen in de aangrenzende lager gelegen gebieden¹. De bosbodem – of vaker nog het bos zelf – wordt door velen gezien als een ‘spons’ die de overvloedige regenval in de natte tijd absorbeert en deze gedurende regenloze periodes langzaam weer afgeeft. Bijkomende voordelen van deze sponswerking zijn in deze opvatting het dempen of zelfs geheel en al voorkomen van overstromingen, bodemerosie en aardverschuivingen². Zo opende keizer Napoleon III na catastrofale overstromingen in de Rhône en Loire in 1855-56 zijn toespraak tot het Franse parlement met de pompeuze belofte dat ‘rivieren, net als revolutie, zullen tijdens mijn regering terugkeren in hun bedding en niet bij machte zijn ooit nog hun kop op te steken’³. De sponstheorie, waar Napoleon III zich op baseerde, vormde vele tientallen, zo niet honderden jaren

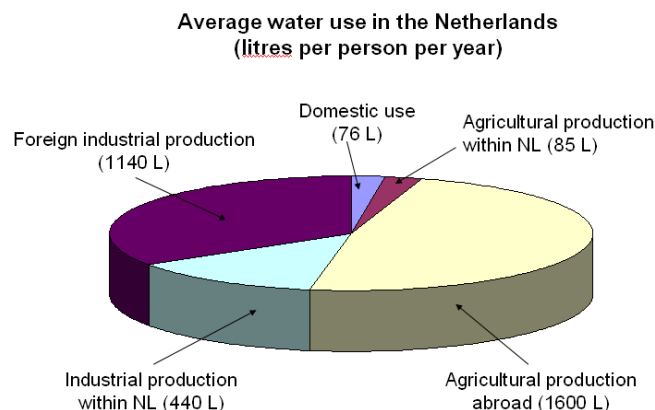
de achterliggende rationale voor het beschermen van bossen in bovenstroomse gebieden^{2,4}.

Tegelijkertijd staan, zoals gezegd, met name de tropische bossen in toenemende mate onder druk en worden zij steeds meer vervangen door allerlei andere vormen van landgebruik om te voldoen aan de gestaag groeiende lokale en internationale vraag naar voedsel, hout, woonruimte, energie in de vorm van brandhout of houtskool, alsmede een scala aan andere producten, inclusief de recent opgekomen vraag naar biobrandstoffen. De druk op het bos varieert van regio tot regio, afhankelijk van lokale of nationale bevolkingsdruk, armoede en alternatieve vormen van inkomsten, beschikbaarheid van en toegang tot landbouwgrond voor kleine boeren, nationale bos- en landbouwpolitiek, internationaal fluctuerende prijzen voor gewassen als koffie, oliepalm, soyabonen of mais, en de al of niet frisse rol van internationale consortia en overheidsdienaren daarin^{4,6}. Binnen Nederland zijn het collega's aan de Universiteiten van Leiden, Amsterdam en Wageningen die zich verdiepen in de achtergronden en drijvende krachten van dergelijke veranderingen, hier wil ik mij vooral richten op de implicaties van een en ander voor de hydrologie.

Sommige overheden hebben de 'sponstheorie' nog steeds hoog in het vaandel en verwijderen landloze boeren die zich in het bosareaal hebben gevestigd om daar hun voedselgewassen of koffie te telen vaak met grof geweld, in de veronderstelling dat op die manier toekomstige overstromingen voorkomen zullen worden (China, Sumatra, Thailand, India)^{4,7,8}. Andere overheden stimuleren juist de omzetting van bos naar akkerbouwland en weiland (Brazilië) of grootschalige oliepalimplantages (Indonesië, Maleisië) in het kader van hun nationale ontwikkeling⁵⁻⁶. Zoals we later zullen zien, gebruiken zowel overheden als niet-gouvernementele instellingen (NGO's) en allerlei natuurbeschoudorganisaties in vrijwel alle gevallen wetenschappelijke informatie selectief om zo hun beslissingen (dan wel aanbevelingen) aangaande het door hen gewenste landgebruik te rechtvaardigen. Bos- en landgebruikshydrologen staan tegenwoordig dan ook centraal in een soms verhitte discussie over de gevolgen van ontbossing (dan wel herbebossing) voor het hydrologisch functioneren van tropische stroomgebieden of het klimaat^{8,9}.

Tropische bossen: een ver-van-mijn-bed-show?

Sommigen onder u zullen zich nu wellicht afvragen: ‘Wat hebben die tropische bossen en hun waterhuishouding nu eigenlijk met ons hier in Nederland te maken?’. Het antwoord daarop is: ‘Misschien wel meer dan u op het eerste gezicht zou denken’. Men heeft becijferd dat wij als Nederlanders gemiddeld zo’n 76 liter water per persoon per dag gebruiken voor huis-, tuin-, en keukendoeleinden. Dat is twee keer zoveel als het waterverbruik van de gemiddelde Sri Lankaan, maar minder dan de helft van wat de gemiddelde Maleisiër per dag gebruikt. Echter, ons indirecte of, zo u wilt, virtuele verbruik van water ligt vele malen hoger: denk aan de hoeveelheden water die benodigd zijn voor de teelt van ons voedsel in binnen- (85 L per persoon per dag) en buitenland (1600 L). Hetzelfde geldt voor de industriële fabricage van allerlei gebruiksproducten (kleding, auto’s, etc.): 440 en 1140 L per persoon per dag voor in Nederland dan wel in het buitenland geproduceerde goederen (Figuur 1). Daarmee komt ons totale waterverbruik uit op meer dan 44 keer zoveel, namelijk op zo’n 3350 L per persoon per dag. Opmerkelijk is dat slechts 18% daarvan zijn herkomst in Nederland heeft, oftewel 82% van het water dat we direct en indirect gebruiken is afkomstig uit andere, vaak verre en soms ook minder waterrijke landen.



Figuur 1. Gemiddeld jaarlijks verbruik van water in Nederland opgesplitst naar verschillende categorieën en herkomst (gebaseerd op gegevens in Hoekstra en Chapagain, 2008)¹⁰.

Ter vergelijking: in het geval van Sri Lanka is slechts 7% van het totale waterverbruik geassocieerd met producten uit het buitenland en zelfs in het verder ontwikkelde Maleisië is dat cijfer met 28% van het totaal nog beperkt. Niettemin is meer dan de helft van het waterverbruik

in de Maleisische land- en plantagebouw gerelateerd aan de verbouw van exportproducten als palmolie en rubber¹⁰. In dit licht gezien wordt de vraag wat de jaarlijkse verdamping is van een regenwoud of van de rubber- en oliepalmpiantages die het natuurlijke woud meer en meer vervangen om de mensheid van allerlei producten te voorzien, van veel directer belang. Dit soort overwegingen gelden in versterkte mate voor beslissingen over het landgebruik in gebieden waar het jaarlijkse neerslagoverschot (regen minus verdamping) klein is of wordt bedreigd door klimaatverandering. Denk hier bijvoorbeeld aan de keuze tussen het planten van suikerriet (met een relatief hoge waterbehoefte maar ook een snel stijgende winstmarge in het kader van de toenemende vraag naar biobrandstoffen) en andere, minder veeleisende (voedsel)gewassen; of aan de grootschalige aanplant van *Jatropha* (een ander veelbelovend biobrandstofgewas waarvan het waterverbruik vooralsnog nauwelijks bekend is) in relatief droge gebieden¹¹. Dergelijke beslissingen hebben serieuze hydrologische consequenties.

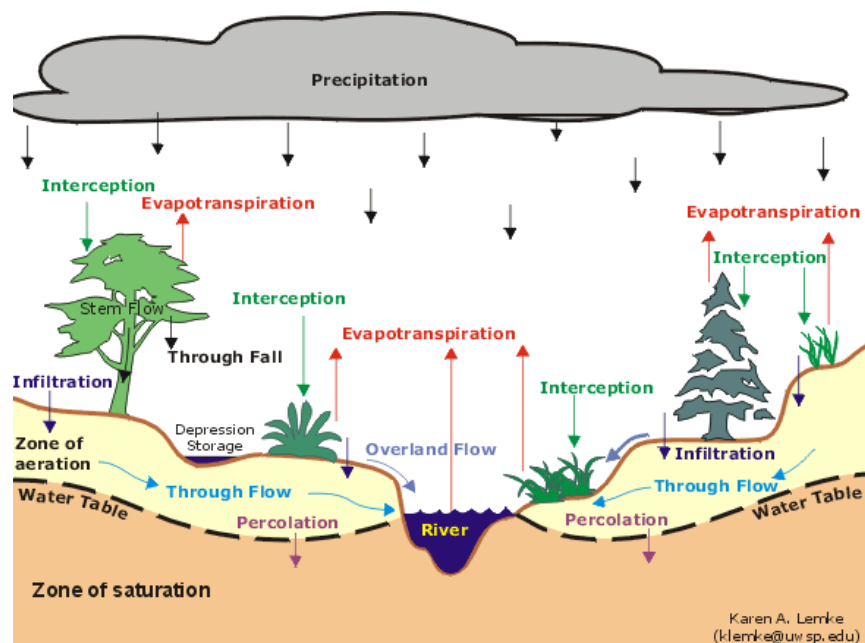
Aan de andere kant van het belangenspectrum staan de natuurbeschermers die de laatste jaren de door bossen en natte gebieden ('wetlands') geleverde 'milieudiensten' of 'ecosysteem-diensten' benadrukken, zoals een betrouwbare watervoorziening van hoge kwaliteit, de opname van koolstof, leverantie van hout, wild en andere producten (inclusief grondstoffen voor medicijnen) en andere op biodiversiteit gebaseerde diensten (zoals het vaak lucratieve ecotourisme). Door de diverse ecosystemendiensten van een geldelijke waarde te voorzien, kan binnen een zogenaamd '*payments for environmental services*' (PES) raamwerk een situatie gecreëerd worden waarin degenen die het bos in kwestie beheren, worden betaald door allerlei belanghebbenden (bijvoorbeeld stedelingen die benedenstrooms wonen) om de ecosysteme-diensten op peil te houden (bijvoorbeeld door middel van duurzaam bosbeheer)^{12,13}. Dergelijke overeenkomsten zijn de laatste jaren als paddenstoelen uit de grond geschoten – vooral in Zuid- en Midden Amerika – maar zijn zelden of nooit gebaseerd op feitelijke hydrologische gegevens. Vandaar dat ook hier de roep om objectieve informatie toe neemt onder het motto: 'Krijg ik wel waar voor mijn geld?'^{14,15}.

In het volgende wil ik met u de huidige stand van het (tropische) 'bossen-en-water'-debat doornemen en ik zal daarbij de cruciale maar vaak over het hoofd geziene rol van de bodem meermaals benadrukken. Daarbij zal ik af en toe ook de rol van het ecohydrologische onderzoek

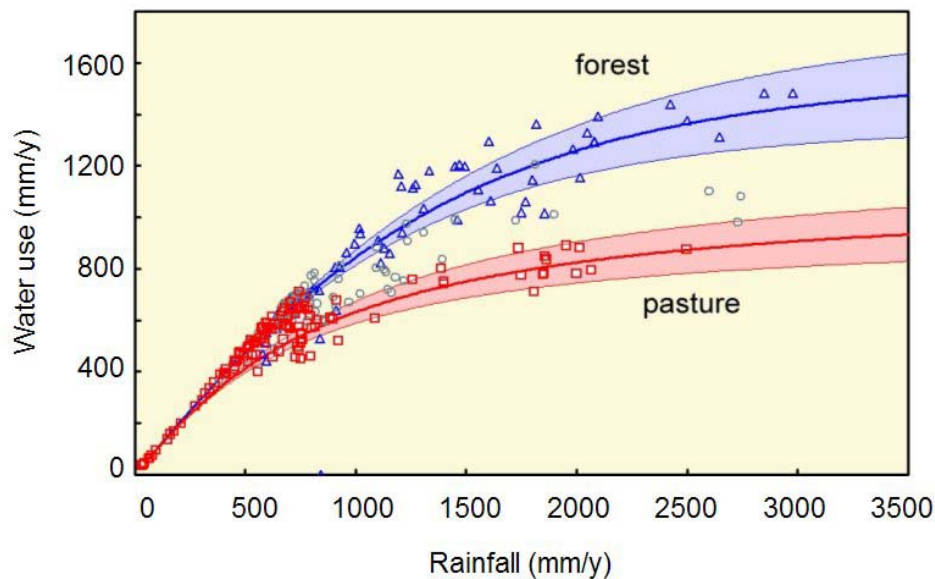
zoals verricht aan de afdeling Hydrologie aan de Vrije Universiteit belichten. Tenslotte wil ik u deelgenoot maken van enkele van mijn wetenschappelijke plannen voor de tijd die mij hopelijk nog rest.

Hydrologische veranderingen bij bosomzetting

De omzetting van volgroeid natuurlijk bos naar weiland, akkerland of bebouwde grond gaat gepaard met min of meer ingrijpende hydrologische veranderingen. Om te beginnen is daar het grotendeels wegvallen van de zogenaamde interceptieverdamping – de onderschepping en min of meer directe verdamping van de neerslag door en vanaf het bladerdak tijdens en vlak na regen (Figuur 2). Als gevolg daarvan bereikt na omlegging van het bos een groter deel van de neerslag het bodemoppervlak, typisch zo'n 10-30% meer, afhankelijk van het bostype (loofverliezend of niet, bijvoorbeeld)¹⁶. Daarnaast is de opname van vocht uit de bodem (transpiratie) tijdens langdurige regenloze periodes groter in het geval van de dieper wortelende bomen dan die van ondieper wortelende weilanden en akkergewassen. Al met al gebruikt een hoogopgaand bos dus beduidend meer water dan grasland of landbouwgewassen, waarbij het verschil toe neemt met toenemende regenval, vooral als gevolg van de hogere interceptieverdamping (Figuur 3)^{17,18}.



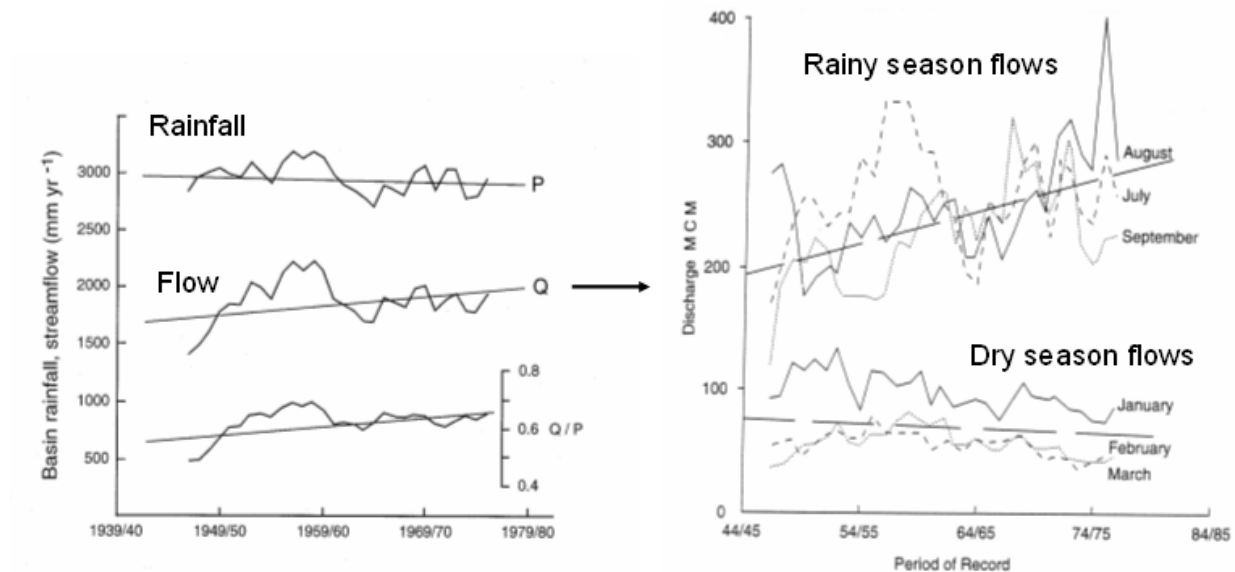
Figuur 2. De boshydrologische cyclus.



Figuur 3. Jaarlijkse verdamping voor bos en grasland als functie van de regenval¹⁷.

Daarnaast verandert bij bosomzetting de manier waarop het regenwater uiteindelijk bij de beken en rivieren terecht komt. Onder ongestoorde omstandigheden – behalve wellicht op zware kleigronden – dringt vrijwel alle netto neerslag (dwz na interceptie) de grond in om vervolgens verdeeld te worden tussen opname door de wortels enerzijds en percolatie naar diepere bodemlagen, het grondwater en de dichtstbijzijnde beek anderzijds¹⁶. Bij machinale verwijdering van het bos, verbranden van kapresten, en bij gebruik en bewerking van het nieuwverworven areaal treedt de nodige verstoring van de bodemstructuur op middels compactie door machines of vee^{9,19,20}. Daarnaast wordt de aanvoer van organische stof via bladval en vertering sterk gereduceerd of stopt deze volledig, terwijl de bodem vaak direct wordt blootgesteld aan felle zon en intense regenval. Dit alles leidt tot een snelle afname van het organische stofgehalte van de bodem en daarmee tot een hogere gevoeligheid voor erosie en, in ernstige gevallen, tot een sterke toename in de afvoer van regenwater langs het oppervlak²¹. Op zijn beurt gaat deze verhoogde oppervlakkige afvoer ten koste van de infiltratie van regenwater in de bodem en daarmee – bij overschrijding van een bepaalde drempelwaarde – van de aanvulling van grondwatervoorraden (Figuur 4)^{9,22,23}.

Mahaweli River, Sri Lanka



Figuur 4. Veranderingen in jaarlijkse regenval en afvoer (links) en seizoenale afvoer (rechts) voor het stroomgebied van de Mahaweli, Sri Lanka²³.

In veel tropische gebieden (o.a. India, Sri Lanka, Thailand, Java, Oost Afrika, Centraal Amerika, Peru) bestaat een duidelijke trend richting verdroging: rivieren voeren allengs minder water in de droge tijd en stevast wordt dit door de lokale bevolking en overheden toegeschreven aan ‘ontbossing’ en het verlies van de voormalige ‘bos-spons’^{4,9,23-25}. Verminderde regenval zou natuurlijk ook een oorzaak kunnen zijn maar ook dat wordt op veel plekken aan diezelfde ‘ontbossing’ toegeschreven, ongeacht de grootte van het areaal in kwestie²⁶. In de laatste 10-20 jaar is daar geleidelijk aan het fenomeen van globale klimaatverandering – al of niet veroorzaakt door het broeikaseffect²⁷ of wisselingen in zonne-activiteit en daardoor bewolkingsgraad²⁸ – bijgekomen; regens worden minder betrouwbaar of vallen in meer geconcentreerde periodes²⁹. Aan de landgebruikshydrologen de taak om hun collega’s in de Dynamische Meteorologie te assisteren bij het vinden van antwoorden op zulke vragen als: ‘Heeft ontbossing een effect op de hoeveelheid regenval en zo ja, op welke ruimtelijke schaal?’ en ‘Hoe kunnen we de effecten van klimaatvariabiliteit en landgebruik op rivierafvoeren onderscheiden?’.

Bomen en rivierafvoeren: herbebossen of niet?

Als gevolg van de wijdverbreide verslechtering van het hydrologisch functioneren van vele tropische gebieden en de afnemende kwaliteit van hun water neemt de roep om herbebossing al jaren toe. Deze trend wordt nog eens versterkt door het toegenomen belang van vastlegging van CO₂ in het kader van de bestrijding van het broeikaseffect en de daarmee gepaard gaande handel in emissierechten binnen het zogenoemde Clean Development Mechanism. Binnen dit kader kunnen landen en bedrijven die meer dan de hun toegestane hoeveelheid CO₂ uitstoten, ergens anders ter wereld ter compensatie activiteiten ontwikkelen die weer CO₂ vastleggen, zoals het aanleggen van grootschalige snelgroeïende houtplantages.³⁰

Het planten van bomen wordt vaak gepresenteerd als een meervoudige win-win situatie: het landschap wordt weer groen, koolstof wordt vastgelegd, rivieren gaan weer stromen, erosie wordt aan banden gelegd, en er wordt werk gecreëerd en dus armoede bestreden. Sommige NGO's claimen ook maar meteen een effect op de regenval. Maar de voorstanders van het massaal aanplanten van bomen hebben met name de laatste 10 jaar forse oppositie ondervonden vanuit min of meer wetenschappelijke hoek. In boeken en rapporten met suggestieve titels als '*The Blue Revolution*' en '*Thriving on facts or drowning in fiction?*' en deels uitgegeven door invloedrijke instellingen als het International Centre for Forestry Research (CIFOR) en de Wereld Voedsel- en Landbouworganisatie (FAO) wordt de eerder genoemde 'sponstheorie' kortweg afgedaan als een mythe: bomen gebruiken nu eenmaal meer water dan andere gewassen (vgl. Figuur 3) en derhalve leidt het planten van bomen *altijd en overal* tot afnemende rivierafvoeren. Bovendien is het volgens deze '*rebels with a cause*' een misvatting om te denken dat bossen overstromingen ('*floods*') zouden kunnen stoppen of dat ontbossing tot significant hogere sedimentatie zou leiden door toegenomen erosie en aardverschuivingen want die komen immers ook voor onder bos^{8,31-33}.

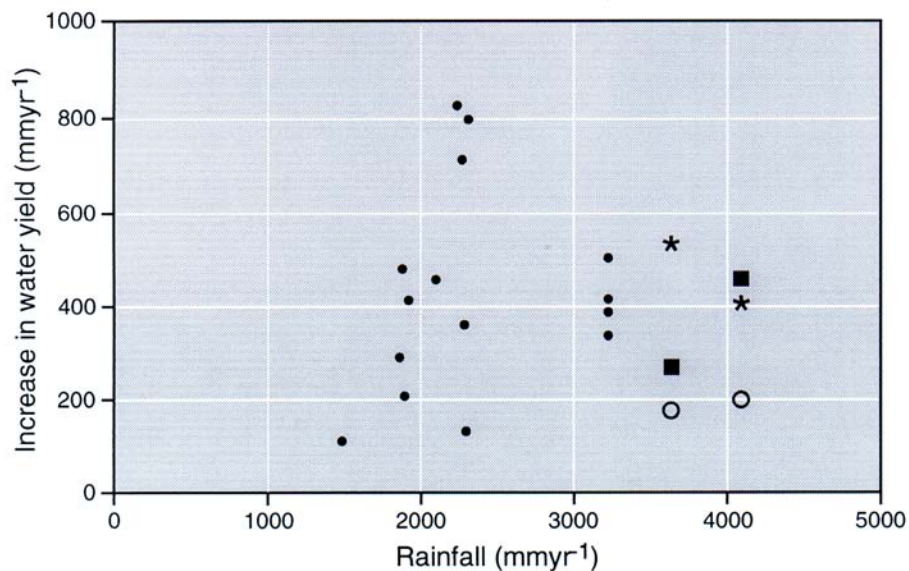
Tijdens het presenteren van deze redeneringen wordt herhaaldelijk gewag gemaakt van het feit dat deze gebaseerd zijn op hard wetenschappelijk bewijs, in tegenstelling tot de achterhaalde opvattingen zoals de sponstheorie die zij bestrijden en die de belastingbetaler alleen maar geld kosten, niet de gewenste resultaten opleveren en ook nog eens veel sociale ellende opleveren doordat arme boeren zonder gegronde reden uit het bos worden geweerd dan wel verwijderd. De aanhangers van het 'nieuwe' hydrologische denken zochten de afgelopen paar jaren actief de

publiciteit en dit heeft niet alleen in artikelen in een groot aantal internationale kranten geresulteerd maar ook in verwarring onder beleidsmakers, zowel in de tropen als in onze streken. Een feitelijke benadering van een dergelijk heikel onderwerp is uiteraard essentieel. In de woorden van mijn favoriete onderzoeker aller tijden – de legendarische Sherlock Holmes:

‘It is a capital mistake to theorize before one has data. Insensibly one is led to twist the facts to suit one’s theories instead of the theories to suit the facts’³⁴ en ook:

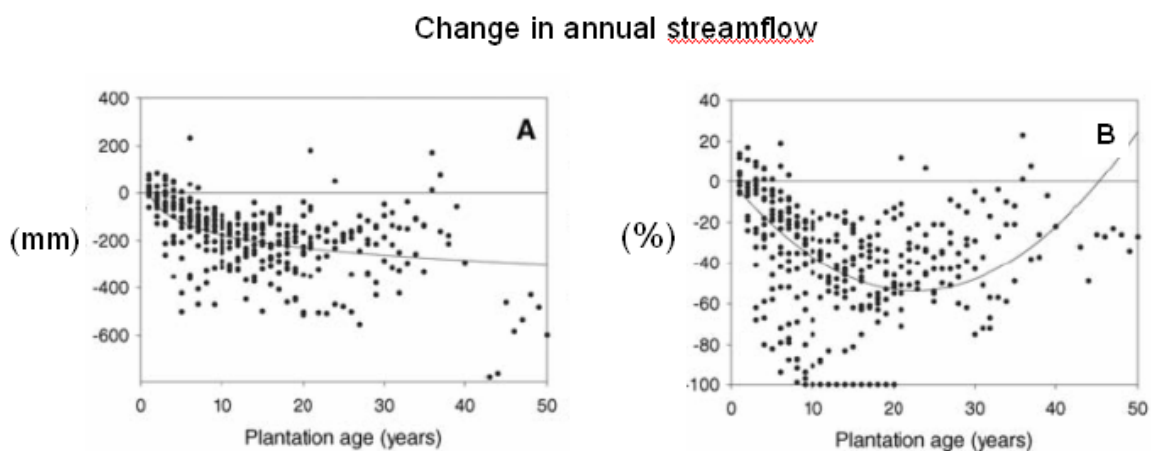
‘The difficulty is to detach the framework of fact from the embellishments of theorists and reporters’³⁵.

Wat zijn die feiten precies waarop de ‘blauwe revolutionairen’ zich baseren? Begin jaren tachtig in de vorige eeuw publiceerden Bosch en Hewlett een overzicht van de resultaten van bijna 100 gecontroleerde experimenten verspreid over de hele wereld waaruit zonneklaar bleek dat het kappen van bos tot hogere rivierafvoeren leidde het jaar rond³⁶. Een soortgelijke analyse van mijn hand voor alleen tropische experimentele studies in 1997³⁷ bevestigde deze conclusie (Figuur 5) evenals verschillende latere analyses²⁰.



Figuur 5. Toename in jaarlijkse afvoer na ontbossing als functie van de bijbehorende jaarneerslag in de vochtige tropen³⁷.

Daar bovenop kwam in 2005 nog een in het prestigieuze blad *Science* verschenen review-artikel van Jackson en anderen dat liet zien dat rivierafvoeren op jaarbasis na bosaanplant wereldwijd flink afnamen (Figuur 6)³⁸. Overigens misten Jackson en zijn mede-auteurs de vergelijkende studie van het waterverbruik van snelgroeiende *Pinus caribaea* plantages en semi-natuurlijk grasland op de Fiji eilanden van de hand van mijn voormalige promovendus en huidige collega Maarten Waterloo. Zijn gegevens impliceerden een nog hogere reductie in afvoeren dan de door Jackson verzamelde studies³⁹.

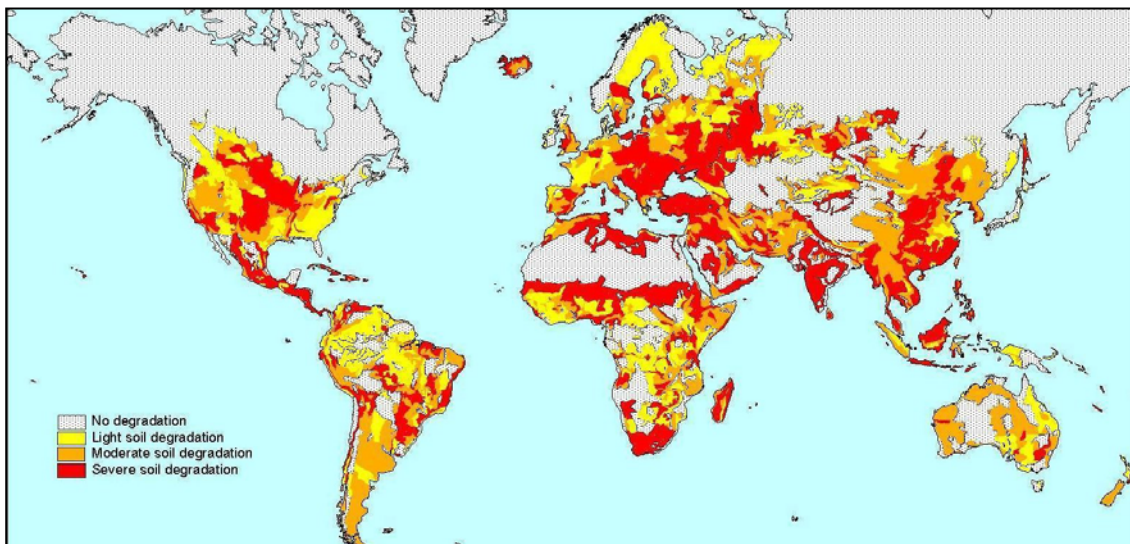


Figuur 6. Afname in jaarafvoer na herbebossing als functie van de leeftijd van het aangeplante bos³⁸.

Weg met de sponstheorie, derhalve? Of toch niet helemaal? Hoewel ontbossing onbetwistbaar leidt tot een toename in de totale hoeveelheid afvoer (de zogenaamde ‘water yield’, Figuur 4 linker paneel en Figuur 5), kunnen de afvoeren gedurende de droge tijd wel degelijk afnemen ten gevolge van de verstoorde infiltratieverhoudingen bij voortgeschreden bodemdegradatie (Figuur 4, rechter paneel). En analoog aan het voorgaande, hoewel de *jaarlijkse* totale waterafvoer na herbebossing onbetwistbaar afneemt (Figuur 6), moeten er ook situaties zijn waarbij de afvoeren *in de droge tijd* daadwerkelijk worden verbeterd na aanplant, zelfs al ontbreekt hiervoor direct bewijs in de wetenschappelijke literatuur. Een dergelijke verbetering moet optreden wanneer de hogere waterconsumptie van het nieuwe bos op zijn minst wordt gecompenseerd door de hoeveelheid extra geïnfiltreerd water na bodemverbetering²².

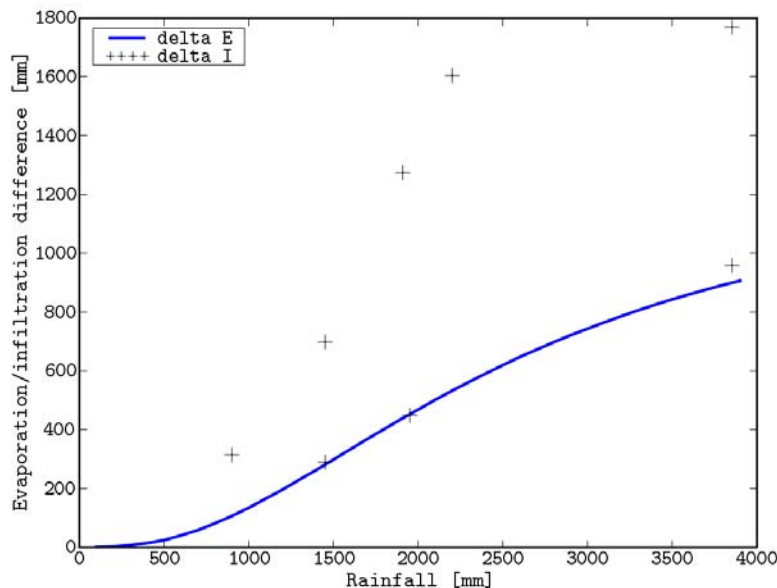
Zulke situaties zijn te verwachten waar de bodems sterk gedegradieerd zijn en waar de neerslag hoog is; dan is er immers het meeste te winnen aan extra infiltratie⁴⁰⁻⁴⁴.

Het eerste van de twee Sherlock Holmes citaten zal volmondig beaamd worden door de ‘blauwe revolutionairen’ maar het tweede wordt hen fataal. Men kan zich weliswaar op feiten baseren maar toch de verkeerde conclusie trekken als die feiten bijvoorbeeld niet representatief blijken te zijn voor de situatie waarop men ze betreft. In het huidige geval, van de meer dan 60 herbebossingsstudies in het overzicht van Jackson en medewerkers betreffen er slechts drie een tropische dan wel sub-tropische situatie en, nog belangrijker, *in geen enkel geval waren de te herbebossen bodems gedegradieerd*³⁸. Hetzelfde geldt overigens voor het zojuist geciteerde werk van Waterloo en anderen in Fiji³⁹. Er viel dus niets te verbeteren aan de infiltratie. Onder dergelijke omstandigheden weerspiegelt de verandering in afvoer simpelweg de toename in waterverbruik van de vegetatie⁹. Gegeven de wijdverbreide en vaak gevorderde degradatie van de bodem in de tropen, sub-tropen en Mediterrane gebieden (Figuur 7)⁴⁵ is de conclusie onvermijdelijk dat er momenteel geen representatieve stroomgebiedsstudies beschikbaar zijn aangaande het effect van herbebossing op rivierafvoeren in de droge tijd voor gebieden met gevorderde bodemdegradatie^{9, 46}.



Figuur 7. Geschatte mate van bodemdegradatie in 1990⁴⁵.

Ondanks het ontbreken van *direct* bewijs voor netto verbetering van het afvoerregime door herbebossing, kan deze theorie (die ik overigens al in 1987 en dus enigszins tegen het eerder geciteerde advies van Sherlock Holmes in op papier zette)^{22,34} wel indirect getest worden aan de hand van deelresultaten. Zo kan men een kwantitatieve vergelijking maken van de verbetering in infiltratie ten opzichte van de gedegradeerde referentiesituatie onder steeds hogere neerslag-overschotten (vochtiger klimaatsomstandigheden). Deze extra infiltratie als functie van de neerslag⁴⁰⁻⁴³ kan men vervolgens vergelijken met aannemelijke waarden voor de toename in waterverbruik van de vegetatie^{16,17,44}. Waar de extra infiltratie het wint van de extra wateropname zal de basisafvoer toenemen en *vice versa* (Figuur 8).



Figuur 8. Vergelijking van de toename in verdamping door de vegetatie (blauwe lijn)¹⁷ met de toename in infiltratie (+) na herbebossing van gedegradeerde gronden⁴⁰⁻⁴³.

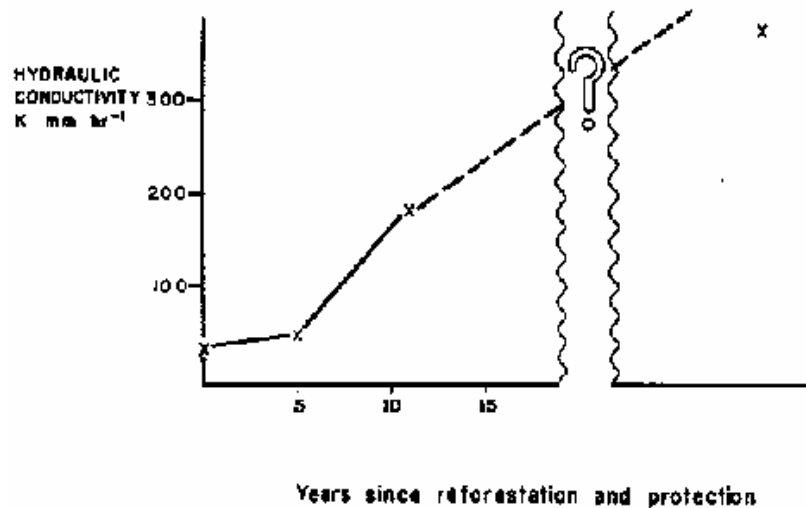
Het is van groot praktisch belang om aan te kunnen geven waar in de tropen het planten van bomen een positief hydrologisch resultaat zou kunnen opleveren en waar de basisafvoeren juist zullen dalen. De uitkomst zal per plek verschillen als gevolg van variaties in neerslag-overschot en seizoenaliteit, bodemtype en -dikte, topografie, en, niet in het minst, de aard van de herbebossing (groenblijvende of loofverliezende, exotische of indigene soorten, snel-groeiend of niet, etc.). Het is uiteraard ondoenlijk om veldexperimenten op te zetten die aan alle combinaties van

factoren recht doen. Daarom is, als eerste stap, eerder dit jaar met steun van Microsoft Ltd. en Conservation International en in nauwe samenwerking met King's College London en CSIRO Land and Water een studie opgezet waarin promovendus Jorge Peña de beschikbare ruimtelijke klimatologische, terrein- en bodeminformatie voor de gehele tropen invoert in een hydrologisch model. Na validatie van het model aan de hand van gemeten rivier-afvoeren voor diverse representatief geachte regio's, worden verschillende degradatie-scenario's gedraaid (afnemende infiltratie) om te zien waar in de tropen de omstandigheden tot grotere verstoring van het afvoerregime leiden (zogenaamde 'hot spots'). Daarnaast zal Jorge de bruikbaarheid testen van alternatieve benaderingen om de mate van landdegradatie ruimtelijk te karakteriseren. Te denken valt aan afwijkingen van de NDVI (een maat voor de groenheid van het landschap) ten opzichte van de langjarige norm (uiteraard gecorrigeerd voor neerslageffecten) als indicator voor vegetatiedegradatie⁴⁷; zo ook zouden verschillen in bodemvochtpatronen in de toplaag (zoals waargenomen door satellieten) tussen minder en meer gedegradeerde gebieden bij vergelijkbare regenval een aanwijzing kunnen zijn voor veranderingen in de infiltratie-capaciteit⁴⁸.

Men zou verwachten dat er al een schat aan informatie bestaat over de geleidelijke veranderingen in infiltratiecapaciteit van tropische bodems na herbebossen. Niets is echter minder waar. In een recent overzichtsartikel bekeken Ilstedt en anderen de resultaten van meer dan 5000 infiltratiestudies⁴⁹. Slechts 14 daarvan bevatten resultaten die bruikbaar waren in een statistische meta-analyse van de effecten van bosaanplant onder tropische condities; de overgebleven data-set was echter te klein om uitspraken te doen over verschillen tussen bodemtypes of aangeplante boomsoorten. Volop werk aan de winkel voor de beginnende bosrologische onderzoeker dus.

In dit verband zal, als alles goed gaat, promovendus Chandra Ghimire in de loop van 2009 in samenwerking met het ITC Enschede de veranderingen in bodeminfiltratiecapaciteit en waterverbruik gaan meten in een serie dennenbossen op eertijds zwaargedegradeerde bodems in de Nepalese Himalaya die 20 jaar geleden ook al onderwerp van infiltratie-onderzoek waren (Figuur 9)⁵⁰. Op deze wijze ontstaat een unieke tijdreeks waarmee het netto effect van bodemverbetering én de wateropname op het hydrologisch functioneren kan worden gekwantificeerd op de langere termijn. Door ook de bodembioologische activiteit (wormen, springstaarten, mijten, etc.) in de verschillende opstanden mee te nemen – en ik denk hierbij

expliciet aan mijn collega's van de Sectie Bodemoecologie – kan een beter beeld verkregen worden van de mate waarin een gedegradeerde bodem zowel ecologisch als hydrologisch gerevitaliseerd kan worden en van de tijd die daarvoor nodig is⁵¹. Een ander belangrijk element van deze studie is een vergelijking van het infiltratiegedrag van de bodem tijdens de droge en de natte tijd. Om praktische redenen worden dergelijke metingen meestal tijdens de droge tijd gedaan, maar er zijn aanwijzingen uit India en Australië dat dit leidt tot overschatting van de infiltratie, met alle gevolgen van dien voor afvoervoorstellingen tijdens de regentijd⁵². Daarnaast hebben puntmetingen van infiltratie zo hun beperkingen, vandaar dat deze in het voorgenomen onderzoek zullen worden vergeleken met actuele metingen van infiltratie op grotere percelen⁵³.



Figuur 9. Verandering in infiltratiecapaciteit van de toplaag van een overbegraasd grasland voor en na aanplant van dennen in het Middengebergte van Nepal. Referentiewaarde (x) betreft ongestoord gemengd woud⁵⁰.

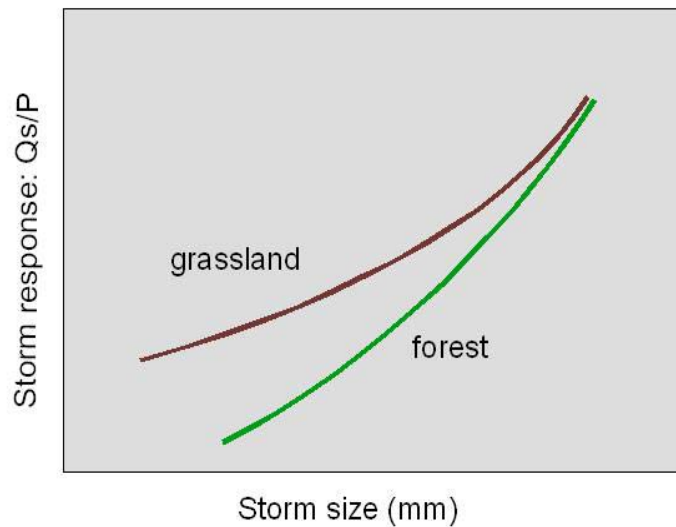
Bosopstanden consumeren zoals gezegd meer water dan voedselgewassen of grasland (Figuur 3). Gezien ook de druk om de voedselvoorziening voor de nog steeds groeiende bevolking in veel tropische gebieden te garanderen⁵⁴, ligt het voor de hand om naar alternatieven te zoeken die gepaard gaan met een lagere waterconsumptie dan die van bossen en die toch de bodem adequaat beschermen tegen erosie^{55,56}. Termen als ‘conservation agriculture’ (landbouw gecombineerd met

een reeks van bodemconserveringmaatregelen) en ‘agroforestry’ (AF, gelijktijdige teelt van voedselgewassen en bomen in allerlei ruimtelijke configuraties) worden in dit verband veel gehoord^{57,58} maar de hydrologische implicaties ervan zijn nog steeds zeer matig onderzocht, met name voor AF^{56,59}. Ook hier valt in principe nog veel te winnen wetenschappelijk gezien, inclusief de koppeling tussen bodembioïologie en bodemhydrologie.

In dit verband worden in Peru en Tanzania deze winter in samenwerking met het Wereld Natuur Fonds en de Stichting CARE een serie (hopelijk langjarige) experimenten opgezet waarin de productie van oppervlakkige afvoer en sediment wordt gekwantificeerd als functie van diverse vormen van CA en FA. Niet-duurzame praktijken in deze gebieden hebben geleid tot hevige erosie en daarmee tot afnemende basisafvoeren en sedimentatieproblemen benedenstrooms^{60,24,25}. Het experiment betreft een vergelijking van verschillende simpele maar sociaal-economisch haalbaar geachte vormen van bodemconservering die naar verwachting tot zowel verminderde erosie als hogere landbouwopbrengsten zullen leiden^{57,58}. De resultaten uit de proefperken zullen mettertijd worden gebruikt in een hydrologisch model om de mate van reductie in stroomafwaartse sedimentatie te schatten als bepaalde conserveringsmaatregelen op grotere schaal zouden worden toegepast^{40,61}. Deze informatie kan dan weer worden verwerkt in een lokaal PES-programma waarin boeren financieel zullen worden gestimuleerd om duurzaam te produceren zonder grote negatieve benedenstroomse gevolgen¹⁴.

Bebossing en overstromingen

De eerder aangehaalde keizer Napoleon III mag dan een extreme vertegenwoordiger zijn geweest van de opvatting dat beboste hellingen door hun sponswerking overstromingen tegengaan of zelfs voorkomen, de algemeen heersende wetenschappelijke opvatting sinds de klassieke voordracht van J.D. Hewlett over het onderwerp in 1982 is toch dat overstromingen simpelweg het gevolg zijn van teveel regen over een te lange periode⁶². Ook in het geval van een bosbodem. Als de opnamecapaciteit van de bodem eenmaal gevuld is door extreme regen, dan helpt er geen lieve moeder meer aan: ‘vol is vol’. Wel is het zo dat onder minder extreme omstandigheden de afvoerrespons op neerslag van bosgebieden gematigder is dan in afwezigheid van bos onder verder gelijkblijvende omstandigheden; dit vanwege de hogere bodemwateropname door het bos die daarmee extra bergingsruimte voor nieuw water creëert (Figuur 10)^{17,46}.

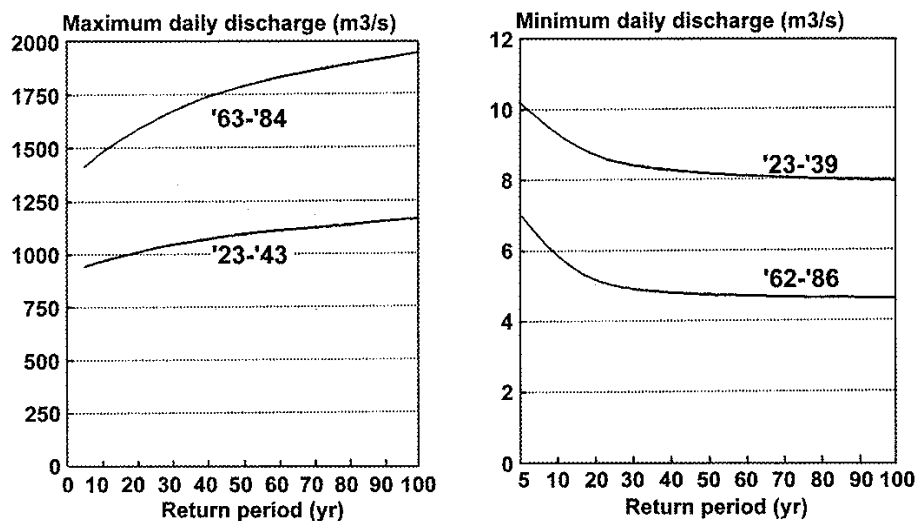


Figuur 10. Conceptuele weergave van de afvoerrespons op neerslag van een stroomgebied onder bos en onder niet gedegradeerd grasland als functie van de hoogte van de neerslag⁴⁶.

Omdat de regeringen van een aantal landen toch grootschalige boomaanplantprogramma's zijn blijven uitvoeren als voorzorgsmaatregel tegen bodemdegradatie en overstromingen, bracht de FAO samen met het eerder genoemde CIFOR een rapport uit in 2005 wat voor eens en altijd orde op zaken moest stellen³². In dit rapport wordt (terecht) gesteld dat de aanwezigheid van bos geen garantie is voor het niet optreden van overstromingen (vgl. Figuur 10). Verder stelt het rapport zonder veel omhaal dat het onzin is dat overstromingen na ontbossing zouden toenemen in grootte of frequentie. Daarom kan het in deze visie niet zo zijn dat arme boeren met geweld van hun moeizaam in bosgebieden gekerfde akkers verwijderd worden om misplaatste hydrologische redenen⁴. Om het argument kracht bij te zetten, bagatelliseert het rapport *en passant* ook nog de positieve werking van bos voor wat betreft het tegengaan van erosie en (ondiepe) aardverschuivingen³².

Hoewel men nog sympathie kan opbrengen voor de sociale beweegredenen van de auteurs van het FAO-CIFOR rapport (overigens voornamelijk economen), geldt dat wat mij betreft niet voor

het selectief citeren van welgevallige waarnemingen c.q. het negeren van niet welgevallige resultaten. Om een voorbeeld te noemen, enerzijds wordt een kort daarvoor gepubliceerd overzichtsartikel van mijn hand⁹ meermalen met instemming door het rapport geciteerd, maar een aantal in datzelfde artikel besproken studies die zonneklaar laten zien dat tropische ontbossing wel degelijk tot hogere extreme afvoeren kan leiden als de ontbossing wordt gevolgd door grootschalige landdegradatie of verstedelijking, worden voor het gemak maar genegeerd (vgl. Figuur 11): een kwalijke zaak voor een internationaal instituut dat toch dient te fungeren als een objectief doorgeefluik voor wetenschappelijke kennis.



Figuur 11. Frequentieverdelingen van piekafvoeren (links) en minimumafvoeren (rechts) voor de Citarum rivier in West Java, Indonesia, voor twee verschillende perioden⁶³.

Figuur 11 illustreert de sterke verhoging van de maximumafvoeren in het stroomgebied van de Citarum (3300 km²) op Java na substantiële verstedelijking van land dat eerder gebruikt werd voor geïrrigeerde rijstbouw (niet eens bos!)⁶³. Een dergelijke toename kan worden verklaard door het gebrek aan infiltratie- en bergingsmogelijkheden in verstedelijkt terrein (daken, erven, verharde wegen). In tegenstelling tot de geleidelijk veranderende reactie van een 'echte' bodem (Figuur 10)⁴⁶, reageert een verhard oppervlak lineair op neerslag; derhalve leveren de grootste

regenbuien direct ook de grootste volumes aan oppervlakkige afvoer op en versterken zij zo de hoogste afvoeren nog verder⁶⁴. Een soortgelijk mechanisme zou ook wel eens op kunnen treden in gebieden met sterk gedegradeerde bodems; ook daar zien we een enorme toename in de respons op neerslag, ook op grotere schaal (vgl. Figuur 4). Het is in dit verband pertinent om op te merken dat de objectieve wetenschapper Hewlett destijds in zijn klassieke overzicht inderdaad de mogelijkheid van toegenomen piekafvoeren open liet in het geval van wijdverspreide bodemdegradatie⁶², een finesse die de schrijvers van het FAO-CIFOR rapport niet op konden brengen^{31,32}. Een ander belangrijk aspect is het feit dat de waargenomen toename in piekafvoeren een groot stroomgebied (3300 km²) betreft terwijl de heersende mening is dat eventuele toenames in een deel van het stroomgebied worden ‘gedempt’ doordat andere delen minder bijdragen, hetzij doordat ze minder aangetast zijn, hetzij doordat het er minder regent⁶².

Het blijkt wederom van groot belang dat men zijn uitspraken baseert op feitelijke observaties. Daarom leek een recente statistische studie van Bradshaw en anderen⁶⁵ een welkome aanvulling in het enigszins door theoretici gedomineerde debat. Genoemde Bradshaw analyseerde de gerapporteerde overstromingsfrequenties (*flood frequency* FF) voor meer dan 56 ontwikkelingslanden over de periode 1990-2000 en relateerde deze aan het percentage overgebleven bos (dan wel de snelheid van bosverlies), daarbij andere factoren als gemiddelde jaarneerslag, helling van het terrein, en de fractie landbouwgrond meetellend. Na een aantal ingewikkelde stappen kwamen de auteurs tot de conclusie dat (i) FF significant negatief gerelateerd was aan het percentage overgebleven bos en (ii) positief gerelateerd aan de snelheid van de ontbossing. Het meest complete model dekte 65% van de variatie in FF, waarvan overigens slechts 14% werd bijgedragen door de factor bosareaal. Het statistische model werd niettemin gebruikt om te voorspellen dat een verhoging in FF van 4-28% per land zou optreden als het bosareaal nog eens met 10% zou afnemen⁶⁵.

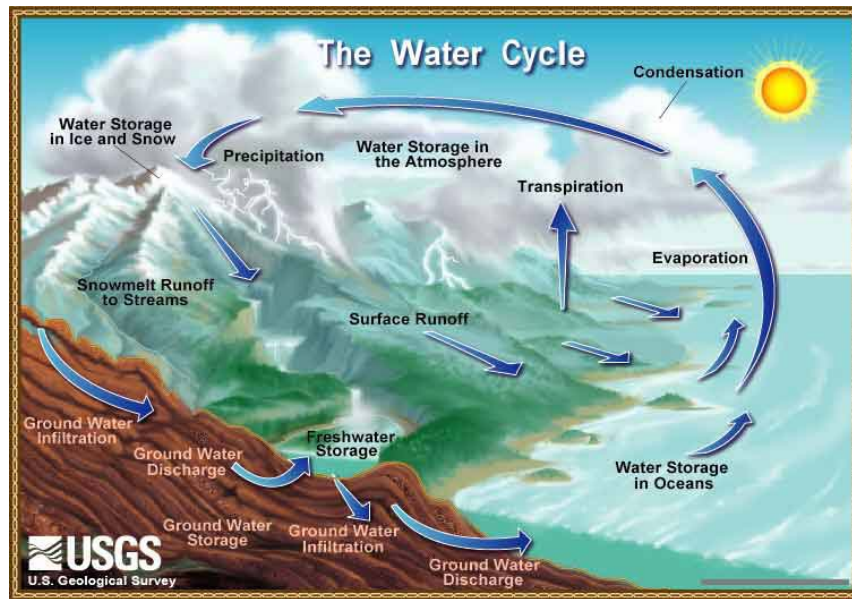
In een commentaar geschreven op uitnodiging van het vooraanstaande vakblad *Nature* gebruikte de bekende tropisch ecooloog en natuurbeschermer (maar geen hydroloog) W.F. Laurance woorden als ‘mijlpaal’, ‘indrukwekkend’ en ‘overtuigend’ voor de nieuwe studie⁶⁶. Daarentegen wezen Van Dijk en anderen (allen hydrologen) in een recent en veel kritischer commentaar⁶⁷ op een aantal beperkingen van Bradshaw’s aanpak en vooral op het feit dat gegevens over de

bevolkingsdichtheid per land wel werden getabelleerd maar niet gebruikt als co-variabele. Van Dijk nam de proef op de som en bevolkingsdichtheid bleek sterk met FF gecorreleerd ($R^2 = 83\%$). Zonder meteen te stellen dat bevolkingsdichtheid een *directe* causatieve factor voor de hoogte van FF is, zijn er natuurlijk wel indirecte verbanden aan te geven: meer mensen houdt in meer impermeabel oppervlak (wegen, dorpen en steden) en daarmee een sterkere hydrologische respons; verder is er een grotere kans op degradatie van bos en bodem vanwege de te verwachten toename in de druk op het land; en (iii) de kans dat een overstroming ook echt gerapporteerd wordt is groter bij een hogere bevolkingsdichtheid.

Verder werk is dus nodig. Daarom gaat in een recent opgestart samenwerkingsverband met Deltares en het IHE in Delft, promovendus Hylke Beck nader in op de relatie tussen landgebruiksverandering en het optreden van piekafvoeren en overstromingen in een aantal contrasterende landschappelijke situaties in de VS, Australië, Java, en Europa. Tevens zal hij proberen om deze relaties modelmatig van een fysische (in plaats van zuiver statistische) verklaring te voorzien, waarbij de vochtigheid en infiltratiecapaciteit van de bodem speciale aandacht zullen krijgen.

Bossen en regenvorming

Alle vegetatiesoorten brengen via verdamping vocht in de atmosfeer. De een wat meer, de ander wat minder, afhankelijk van hun energiebalans, bladoppervlak, worteldiepte en aërodynamische ruwheid¹⁶. Dit vocht stijgt op en condenseert door afkoeling tot wolken die hun water weer afgeven als regen (Figuur 12). Als een gebied maar groot genoeg is dan kan een deel van het verdampte water in hetzelfde gebied weer uitregenen. De mate waarin dit optreedt, wordt wel de ‘*precipitation recycling ratio*’ genoemd⁶⁸. Een veel gehoorde uitspraak is dat het Amazonewoud de helft van zijn eigen regen genereert, de andere helft van het vocht in de atmosfeer is afkomstig van de oceaan. Deze uitspraak is onder andere gebaseerd op waarnemingen van het gehalte aan stabiele zuurstofisotopen ($\delta^{18}\text{O}$) in de neerslag met toenemende afstand tot de oceaan. Normaliter nemen deze hoeveelheden landinwaarts snel af door uitregenen maar in het geval van Amazonia bleek de afname veel minder, iets wat alleen verklaard kon worden als er ook weer isotopen bij kwamen door verdamping⁶⁹.



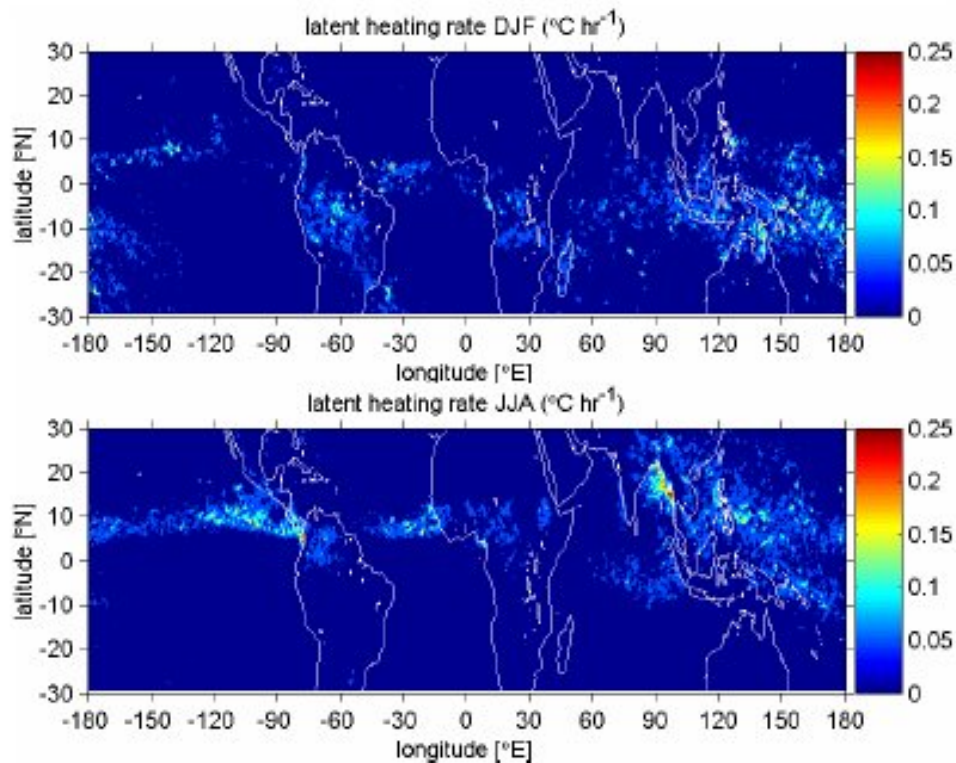
Figuur 12. Impressie van de grootschalige hydrologische cyclus.

In zo'n situatie bestaat het gevaar dat als het bos wat zoveel vocht in de atmosfeer brengt wordt vervangen door een vegetatietype wat veel minder verdampt, de hoeveelheid regen negatief wordt beïnvloed. Omdat dit lastig experimenteel is aan te tonen op een dergelijk grote schaal zijn er de afgelopen 30 jaar een flink aantal computersimulaties uitgevoerd waarin het Amazonewoud in zijn geheel vervangen werd door weiland⁷⁰⁻⁷². Naarmate de modellen verfijnder en beter werden, werd het voorspelde effect op de regenval navenant kleiner^{9,71}. De beste schattingen laten nu een vermindering van minder dan 10% van de jaarneerslag zien. Dat lijkt vrij weinig in een dergelijk vochtig klimaat, maar als de verandering vooral optreedt gedurende de kritische overgang van het droge naar het natte seizoen, dan zijn de ecologische effecten potentieel belangrijk. In combinatie met het optreden van door externe factoren – zoals het El Niño fenomeen – gestuurde langdurige droogte is zelfs een overgang van regenwoud naar savanna niet uit te sluiten^{70,73}. De rol van de bodem als vochtbergingsreservoir in deze lijkt cruciaal maar is nauwelijks onderzocht. De verschillende modellen zijn het echter nog niet eens over de precieze maanden waarin de regen het meest afneemt^{70,72,74}. Daarnaast voorspellen de meer recente studies zgn. 'tele-effecten' op soms duizenden kilometers afstand door corresponderende veranderingen in grootschalige luchtbewegingen⁷⁴. Analoog aan het voorspelde negatieve effect van grootschalige bosomzetting op neerslag ligt het in de lijn der verwachting dat grootschalige

‘regreening’ een positief effect zou kunnen hebben⁷⁵. Een interessant geval betreft de zuidelijke Sahel (Niger) waar de afgelopen jaren een opvallende vergroening is opgetreden, zowel vanwege hogere regenval in de laatste jaren als een verandering in boombeheer door lokale boeren⁷⁶.

Recent is een nieuwe theorie gelanceerd, die van de ‘biotische pomp’⁷⁷. In deze visie zorgt de grote opwaartse ‘verdampende kracht’ van bossen voor luchtopstijging die tot aanzuiging van nieuwe vochtige lucht leidt, etc. Hoewel het concept velen direct aansprak, niet in het minst vanwege de waarde van de theorie als argument voor bosbehoud, bleek de theorie afgelopen maand niet bestand tegen de kritisch-fysische blik van VU-meteoroloog Antoon Meesters⁷⁸. Er zijn echter situaties waarbij wel degelijk sprake is van een extra drijvende kracht die de lucht tot grotere hoogten kan opstuwten en daardoor bewolking en neerslag beïnvloedt. In kust- en eilandgebieden warmt het land overdag sterker op dan de omringende oceaan. Dit temperatuurverschil leidt tot een zeebries die de reeds optredende opstijging van warme lucht boven het land door convectie verder versterkt, vooral op kleinere eilanden (< 100 km doorsnee) waar de zeebries van verschillende kanten samen kan komen (convergentie)⁷⁹. Een en ander wordt bevestigd door satellietopnamen van de temperatuur op het niveau van de wolke toppen hoog in de atmosfeer. De diepste convectie (hoogste wolke toppen) treedt op boven het zgn. ‘Maritieme Continent’ (Indonesië en omgeving) en andere gebieden rijk aan eilanden (Figuur 13)⁸⁰. Deze bevinding van post-doctoraal onderzoeker Michiel van der Molen laat zien hoe belangrijk een juiste weergave van de rol van eilandgroepen is voor het modelleren van globale atmosferische circulaties en daarmee het voorspellen van tropische neerslagpatronen.

Van speciaal belang in de huidige context is dat veranderingen in vegetatiebedekking die gepaard gaan met verdere opwarming van de lucht (zoals ontbossing) zullen leiden tot een versterking van het zeebrieseffect en daarmee van de hoogte van zowel de wolkenbasis als de top van de wolken⁸¹. De waarneming dat de wolkenbasis enkele honderden meters steeg nadat de bossen op Puerto Rico ontdaan waren van hun gebladerte door een wervelstorm en daarom tijdelijk niet hun koelende functie konden uitoefenen, bewijst deze stelling⁸². Als zodanig is het te verwachten dat wijzigingen in het landgebruik in de maritieme tropen een disproportioneel groot effect op de globale tropische circulatie zullen hebben⁸⁰. In een nieuw door Van der Molen voorgesteld project hoopt de afdeling hier verder aan te werken.



Figuur 13. Ruimtelijk patroon van vrijkomende warmte bij de vorming van hoge bewolking in de winter (bovenste paneel) en in de zomer (onderste paneel)⁸⁰.

Nevelwouden: de laatste ecohydrologische onbekenden

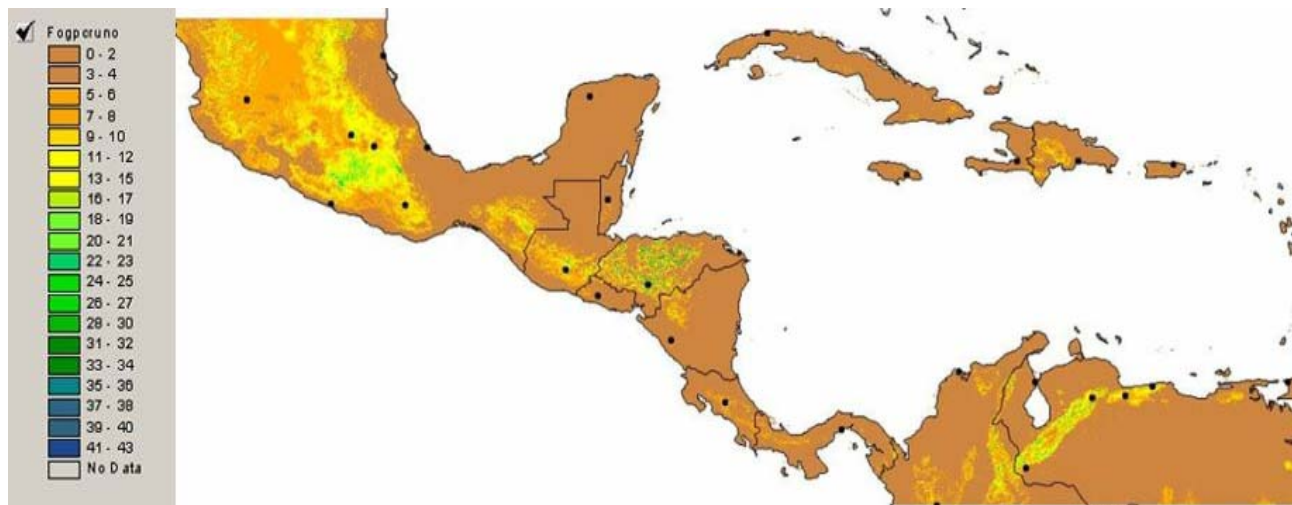
Bestijgt men een berg in de vochtige tropen dan geraakt men vroeg of laat in de wolkenzone en daar verandert het uiterlijk – en daarmee het ecologisch en hydrologisch functioneren – van het bos dramatisch. De stammen en takken in deze ‘nevelwouden’ zijn vaak bedekt met een dikke laag mos, de bomen grillig van vorm, het is er nat en de zon schijnt er zelden. Deze onherbergzame wouden zijn echter van groot hydrologisch belang omdat de boomkronen extra water ‘kammen’ uit de passerende wolken, zodanig dat de hoeveelheid ‘drup’ die de bosvloer bereikt vaak groter is dan de regenhoeveelheid die buiten het bos wordt gemeten. Voeg daar de lage verdamping aan toe vanwege de hoge luchtvochtigheid en geringe straling en het zal duidelijk zijn dat nevelwouden meer water produceren per eenheid regenval dan gewone bergregenwouden^{83,84}.

Als de hoeveelheden ingevangen wolkenwater werkelijk zo groot zijn als velen denken dan zou het omzetten van deze bossen naar weiland of landbouw wel eens tot een sterke verlaging van rivierdebieten kunnen leiden. Daarmee kan de watervoorziening voor benedenstrooms gelegen steden tijdens de droge tijd in gevaar komen⁸⁴. Samen met hun hoge biologische waarde maakt dit dat nevelwouden vaak hoge beschermingsprioriteit genieten⁸⁵. Niettemin neemt het areaal aan bergbos nog sneller af dan dat van laaglandregenwoud⁵, vandaar dat nevelwouden de laatste jaren steeds meer onderdeel worden van PES-initiatieven om het tij te keren^{14,15}. Tegelijkertijd staan deze bossen onder druk vanwege de algemene opwarming van de atmosfeer alsmede van de al gesignaleerde veranderingen in de hoogte van de wolkenbasis als gevolg van ontbossing in het laagland⁸¹.

De afgelopen 15 jaar heeft de VU ecohydrologisch pionierswerk verricht in nevelwouden. In Jamaica en Puerto Rico hebben promovendi Rai Hafkenscheid, Michiel van der Molen en Friso Holwerda de eerste betrouwbare micrometeorologische verdampingsmetingen in nevelwoud op verschillende hoogtes boven zeeniveau uitgevoerd⁸⁶⁻⁸⁸. Ook zijn verschillende methoden getest of ontwikkeld om de hoeveelheid ingevangen mist te bepalen^{88,89}. In een van de meest complete studies tot nu toe – het FIESTA project in het noorden van Costa Rica – is voor het eerst het hydrologisch effect van een omzetting van nevelwoud naar weiland gekwantificeerd. Tot verrassing van iedereen bleek het netto effect op de afvoer neutraal: het verlies aan ingevangen horizontale neerslag en mist werd gecompenseerd door het lagere waterverbruik van het grasland⁸⁹. *En passant* werd wat wel eens de natste plek op aarde zou kunnen zijn ontdekt door promovendus Arnoud Frumau. Hij ontwikkelde een regenmeter voor speciaal gebruik onder zeer winderige omstandigheden waarbij de regen vrijwel horizontaal binnen komt. Op de door winden gegeselde Cerro Amigo ving een gewone regenmeter 2140 mm per jaar, terwijl de aangepaste regenmeter 18720 mm aan horizontale neerslag registreerde⁸⁹.

Het FIESTA project heeft ook kaarten geproduceerd voor heel Midden Amerika en aangrenzende gebieden waarop de gemodelleerde mistinvang staat weergegeven⁹⁰. Hoewel de absolute waarden vrijwel zeker afwijken van de werkelijkheid, geven de kaarten toch een goed beeld van waar de ‘hot spots’ te vinden zijn en dus welke gebieden vanuit hydrologisch (en daarmee vaak ook ecologisch) oogpunt speciale bescherming verdienen (Figuur 14). Een alternatieve toepassing van

de kaarten betreft het herbebossen van gedegradeerde gebieden met weinig regen maar veel mist, waarbij het voor de jonge aanplant benodigde water geleverd zou kunnen worden door grote mistvangnetten totdat de boompjes groot genoeg zijn om hun eigen mist in te vangen⁹¹. Mocht u dit vooralsnog onrealistisch voorkomen dan wijs ik u op het grote belang van mist voor de ‘redwoods’ in Californië⁹² en andere mist ‘oases’ langs de Pacifische kust van de Amerika’s⁹³.



Figuur 14. Ruimtelijke weergave van het relatieve belang van mistinvang in Centraal Amerika en omliggende gebieden (% van regen)⁹⁰.

Rest mij nog te vermelden dat de in het FIESTA project ontwikkelde meettechnieken en modellen momenteel worden toegepast in Oost Mexico, Colombia, en binnenkort hopelijk in Bolivia, Guatemala en Tanzania, vrijwel steeds als onderdeel van PES-haalbaarheidsstudies.

Perspectief

Hoewel in sommige tropische gebieden het bos mondjesmaat terugkeert vanwege de trek van platteland naar de stad⁹⁴, zullen gezien de huidige demografische trends in de meeste gebieden de resterende bossen grotendeels het veld gaan ruimen om plaats te maken voor landbouw, plantages en bewoning. Vanuit ecologisch, sociaal, hydrologisch en erosie-perspectief is het een uitdaging om de overgang met zo min mogelijk kleerscheuren te laten gebeuren. Om bij dat laatste te

blijven, er zijn aanwijzingen dat minimaal 20-30% van een stroomgebied bebost dient te blijven om te voorkomen dat de sedimentlast van de rivieren exponentieel omhoog schiet. Daarbij lijkt het niet uit te maken of dit natuurlijk of aangeplant bos is⁹⁵. Hydrologisch (en ecologisch) gezien maakt het echter wel degelijk verschil. Met name jonge secundaire bossen⁵¹ en jonge snelgroeiende exotische houtplantages⁴⁶ gebruiken vaak veel meer water dan het oorspronkelijke woud en men moet derhalve rekening houden met een tijdelijk negatief effect op de waterleverantie uit dergelijke gebieden. Echter, informatie over de duur en mate van het extra watergebruik van secundaire tropische bossen is vrijwel afwezig⁵¹. Hetzelfde geldt voor de milieueffecten van ‘*exotic invaders*’, vaak agressieve indringers van buiten die de oorspronkelijke vegetatie verdringen. Een schoolvoorbeeld betreft de soort *Miconia calvescens* die inmiddels meer dan tweederde van Tahiti bedekt, waar de soort bekend staat onder de naam ‘de groene kanker’. Intussen is *Miconia* aangekomen op Hawai’i waar met man en macht wordt gewerkt om verspreiding tegen te gaan⁹⁶. Juist vanwege hun buitengewoon sterke groei mag verwacht worden dat deze exoten disproportioneel veel water verbruiken.

Dit soort belangrijke lacunes in onze kennis maakt het moeilijker om de gevolgen voor de waterhuishouding van grootschalige veranderingen in landgebruik goed te voorspellen. Men zou verwachten dat de fondsen voor wetenschappelijk onderzoek in deze richting een stijgende lijn vertonen gezien het evidente maatschappelijk belang van solide hydrologische en bodemkundige informatie voor evenwichtige landinrichting in een tijd waar de natuurlijke hulpbronnen steeds meer onder druk komen te staan. Het omgekeerde lijkt eerder het geval. Universiteiten hebben sinds enkele jaren door bezuinigingen of interne veranderingen in verdeelsleutels geen eigen geld meer (over) voor onderzoek en om natuurwetenschappelijk tropenonderzoek nog gefinancierd te krijgen door het Ministerie van Onderwijs (NWO, WOTRO) moet een en ander tegenwoordig bij voorkeur ingebed zijn in sociaal-economische vraagstellingen. In sommige gevallen is dat een juiste benadering, bijvoorbeeld in het kader van het ontwikkelen van een PES-programma of het begrijpen van de onderliggende sociaal-economische of politieke oorzaken van landdegradatie dan wel vergroening, en in mijn ervaring vormen zich dergelijke verbanden op organische wijze in plaats van bovenaf opgelegd. Vaak ook kan men in eerste instantie volstaan met meer gericht fysisch onderzoek waar andere disciplines vervolgens in een later stadium verder mee kunnen. De huidige nadruk in het Nederlandse bestel op projecten waarin naar een directe integratie wordt

gestreefd tussen sociaal-economische en natuurwetenschappelijke componenten zonder de daarvoor benodigde ruime middelen bevordert mijns inziens een oppervlakkiger natuurwetenschappelijke onderzoekscultuur die qua niveau niet al te veel verschilt van de geïntegreerde modelmatige aanpak van ingenieursbureaus. Er valt nog veel te winnen door eerst verschillende natuurwetenschappelijke takken van sport samen te laten werken binnen één groot project waarbij ecologische aspecten op natuurlijke wijze voor focus en verbinding zorgen. Voorbeelden van deze aanpak bij onze oosterburen zijn het Tropical Mountain Rainforest project in de zuid-ecuadoriaanse Andes⁹⁷ en het voorgenomen onderzoek naar de effecten van klimaatverandering op het ecologisch functioneren van Mount Kilimanjaro in Tanzania⁹⁸ (beide gefinancierd door de Deutsche Forschungsgemeinschaft, het equivalent van het Nederlandse NWO).

Maar er is hoop. Net als in de tropische natuurbeschermingsarena, waar overheden het om allerlei redenen grotendeels af hebben laten weten, zijn het de grote NGO's die het verschil aan het maken zijn. Grote stukken natuurlijk bos worden gepacht of zelfs aangekocht en programma's worden ontworpen waarin de lokale bevolking alternatieven krijgt aangeboden voor haar levensonderhoud die minder schadelijk zijn voor het milieu dan bijvoorbeeld kappen en branden van het bos⁹⁶. Zoals gezegd kunnen PES-programma's hier wellicht een stimulerende rol in spelen maar ontbreekt het vaak aan de benodigde onderliggende kennis van de bos-bodem-water relaties¹²⁻¹⁴. In dat verband verwacht ik veel van het 'Forest Landscape Restoration' initiatief waarin de belangrijkste spelers op dit terrein hun krachten hebben gebundeld⁹⁹ en waarin ik mijn steentje hoop bij te dragen de komende jaren.

Het is bemoedigend om te zien dat een van de leidende NGO's op dit terrein, het Wereld Natuur Fonds (WNF), heeft ingezien dat ondersteuning vanuit wetenschappelijke hoek van belang is voor het succesvol opzetten van bijvoorbeeld PES-programma's en dat zij daar ook de fondsen voor beschikbaar stelt. Naast ontwikkelingsgelden, verwerven dergelijke NGO's hun middelen via donaties van particulieren en charitatieve stichtingen maar in toenemende mate ook via bedrijven. Dit opent perspectieven voor het financieren van gecombineerd ecohydrologisch en socio-economisch onderzoek ter ondersteuning van de '*hands-on*' benadering van het WNF door (het combineren van) bijdragen vanuit bedrijven die belang hebben bij een goed inzicht in het functioneren van de stroomgebieden waar zij hun water betrekken. Te denken valt aan frisdrank-

en mineraalwaterproducenten, bierbrouwerijen, distilleerders, waterleidingbedrijven, electriciteitsproducenten, irrigatie-associaties, etc.^{14,100} Natuurlijk ligt het risico van belangenverstrengeling op de loer maar met het WNF als ‘buffer’ ben ik optimistisch over de mogelijkheden om de traditionele financieringsbronnen voor onderzoek op deze wijze aan te vullen. Een bijkomend voordeel is de directe toepassing van de nieuw verworven kennis, iets waar het vaak aan ontbreekt bij ‘regulier’ onderzoek.

Dankzegging

Aan het eind van mijn betoog komend, wil ik graag mijn leermeesters publiekelijk eren: in de geologie zijn dat allereerst wijlen professor Jan van de Fliert (zijn motto ‘*c’est la vie d’un geologue*’ bij fysiek ongemak in het veld geeft me nog altijd troost) en vooral dr. Henk van Lunsen met wie ik een aantal magische voorzomers heb doorgebracht tijdens onze jaren als begeleiders van het eerstejaarsveldwerk geologie in de Provence. Het gros van mijn onderwijs in de hydrologie en de meteorologie heb ik ontvangen van professors Ben Engelen en Hans Vugts. Van de eerste heb ik geleerd om direct de geologische opbouw van een gebied als belangrijke bepalende hydrologische factor mee te nemen en om niet bang te zijn om afwijkende standpunten te onderzoeken, ook als die ingaan tegen de gevestigde mening. Tevens heeft het feit dat ik zowel mijn doctoraalstage als mijn promotie onder Ben’s leiding in de tropen heb uitgevoerd, mijn verdere loopbaan blijvend bepaald. Van Hans heb ik het belang van goede planning, goed meten en goed instrumenteel onderhoud meegekregen. Door ons gezamenlijke micrometeorologische werk in Fiji en Puerto Rico ben ik ook doordrongen geraakt van het grote belang van goede technische ondersteuning, zoals die al jaar en dag wordt geleverd door de mannen van de fijnmechanische werkplaats, electronica, en het veldwerkmagazijn. Het zou niet minder dan een ramp zijn voor het ecohydrologische onderzoek aan de VU als deze ondersteuning onbetaalbaar zou worden vanwege nieuwe ‘spelregels’ opgelegd door managers met te weinig gevoel voor wat wetenschap eigenlijk drijft.

Mijn ecologische en bosbouwkennis heeft veel te danken aan mijn vroege interacties met dr. Freerk Wiersum die mij in het begin in Indonesië met raad en daad terzijde stond en mij voor het eerst liet kennismaken met de wildernis van een tropisch bergbos; mijn bodemkundige kennis opgedaan aan de Universiteit van Amsterdam onder leiding van wijlen dr. van Schuylenborgh en

professor Koos Verstraten kwam mij goed van pas bij latere expedities naar de oerwouden van de Filippijnen, Oost-Maleisië en Centraal Kalimantan met wijlen professor John Proctor (University of Stirling, Scotland); deze en andere tochten vormen onvergetelijke herinneringen aan een welhaast voorbijge wereld. Veel van onze vroege onderzoeksbossen hebben het veld immers al moeten ruimen in de tussentijd.

Tenslotte is de richting van mijn wetenschappelijke carrière sterk beïnvloed geweest door professor emeritus Lawrence Hamilton (Canada) en professor Ian Calder (U.K.). De eerste wees mij op het hydrologische belang van bergnevelwouden in een tijd dat deze nog volledig *terra incognita* waren, terwijl het vroege werk van Calder mij destijds stimuleerde als jonge onderzoeker om ook te gaan publiceren. Het feit dat we het later vaak grondig oneens zijn geweest over de precieze hydrologische rol van tropische bossen doet niets af aan mijn waardering voor zijn pionierswerk. Last, but certainly not least, heb ik veel te danken aan professor Han Dolman, mijn buurman en tegenwoordige baas op de VU. Niet alleen heeft hij zich sterk gemaakt voor mijn bevordering maar vooral is hij de afgelopen jaren in zowel wetenschappelijk als management-opzicht een belangrijk voorbeeld geweest. Het is een understatement om te zeggen dat mede dankzij zijn strategisch inzicht, doorzettingsvermogen en tomeloze inzet de sectie Ecohydrologie is uitgegroeid tot een van de toonaangevende onderzoeksgroepen op dit terrein.

Ik dank de bestuurders van de Faculteit der Aard- en Levenswetenschappen en van de Vrije Universiteit voor het in mij gestelde vertrouwen en mijn directe collega's voor de meer dan prettige samenwerking.

In de loop der jaren heb ik het voorrecht gehad een vijftiental promovendi en post-docs tot de eindstreep te mogen begeleiden. In een aantal gevallen zijn zij vrienden voor het leven geworden. Het is niet overdreven om te stellen dat ik veel van mijn eventuele wetenschappelijke reputatie aan hen heb te danken. Momenteel zijn er nog eens een tiental promovendi en post-docs bezig of staan in de startblokken. Ik verheug me erop hun werk tot een goed einde te helpen brengen, zij het vanaf nu als promotor.

Een van de meest stimulerende aspecten van deze baan is het omgaan met studenten, die sinds een paar jaar afkomstig zijn uit alle werelddelen. Hun jeugdige energie en élan vormt het noodzakelijke tegenwicht tegen de neiging tot cynisme en het '*seen it all before*' gevoel dat zich nog wel eens meester wil maken van oudere heren. Het is te betreuren dat deze universiteit juist studenten van buiten de Europese Unie – in mijn ervaring vaak het meest gemotiveerd van allemaal – het volle pond laat betalen. Als honderden miljoenen opgebracht kunnen worden om een nieuwe prestigieuze campus neer te zetten dan zou er toch zeker een beurzenfonds voor talentvolle mensen uit het verre buitenland vanaf moeten kunnen. Een dergelijke investering zal zich meer dan terug betalen in de vorm van goodwill, afzet en ook promotievergoedingen.

Ik dank mijn ouders voor de vrijheid die zij mij altijd lieten in mijn keuzes – zelfs als die hen niet aanspraken – en voor hun niet aflatende steun, zowel financieel als moreel. Het stemt mij tot grote dankbaarheid dat zij, ondanks mijn eigen gevorderde leeftijd, hier aanwezig kunnen zijn. Irene dank ik oprecht voor haar steun en genegenheid over vele jaren en voor haar in de regel zeer verfrissende relativerende opmerkingen over de plaats van de wetenschap in het leven.

Tenslotte bedank ik Hans Overdevest voor zijn positivisme, visie en aanmoediging door de jaren heen. Echter, zonder de fundamentele inzichten in de aard van het leven opgedaan in de omgang met mijn spirituele leermeesters Alexander Smit en Jan van Delden had ik het als hooggevoelige jongen niet volgehouden in de harde wereld van de wetenschap. Ik beschouw het als een buitengewoon voorrecht hen – en daarmee mijzelf en iedereen – te hebben leren kennen. Want uiteindelijk is zelfkennis de enige ware kennis.

Ik heb gezegd.

Referenties

1. Pereira, H.C., 1989. *Policy and practice of water management in tropical areas*. Westview Press, Boulder, Colorado.
2. Hamilton, L.S. & King, P.N., 1982. *Tropical forested watersheds. Hydrologic and soils response to major uses or conversions*. Westview Press, Boulder, Colorado.
3. Whited, T.L., 2000. Extinguishing disaster in Apline France: The fate of reforestation as technocratic debacle. *GeoJournal* 51: 263-270.
4. Forsyth, T. & Walker, A., 2008. *Forest guardians, forest destroyers. The politics of environmental knowledge in Northern Thailand*. University of Washington Press, Seattle.
5. Drigo, R., 2004. Trends and patterns of tropical land use change. In *Forests, water and people in the humid tropics*, M. Bonell & L.A. Bruijnzeel (eds.), pp. 9-39. Cambridge University Press, Cambridge.
6. Geist, H.J. & Lambin, E.F., 2001. *What drives tropical deforestation? A meta-analysis of proximate and underlying causes of deforestation based on subnational case study evidence*. *LUCC Report Series* no. 4, University of Louvain, Louvain-la-Neuve, Belgium.
7. Verbist, B., 2008. *Assessment of watershed functions to support negotiations in a catchment under land use conflict in sumberjaya, Lampung, Sumatra, Indonesia*. Doctoral dissertation no. 805, Faculty of Bio-Engineering Sciences, Catholic University of Leuven, Leuven, Belgium.
8. Calder, I.R., 2005. *The Blue Revolution: Land use and integrated water resources management*, 2nd edition. EarthScan Publishing, London.
9. Bruijnzeel, L.A., 2004. Hydrological functions of tropical forests: not seeing the soil for the trees? *Agriculture Ecosystems and Environment* 104: 185-227. Special issue edited by T.P. Tomich, M. van Noordwijk & D.E. Thomas, *Environmental Services and Land Use Change: Bridging the Gap between Policy and Research in Southeast Asia*. DOI: 10.1016/j.agee.2004.01.015.
10. Hoekstra, A.Y. & Chapagain, A.K., 2008. *Globalization of water: Sharing the planet's freshwater resources*. Blackwell Publishing, Oxford, U.K.
11. Jongschaap, R.R.E., Corré, W.J., Bindraban, R.S. & Brandenburg, W.A., 2007. *Claims and facts on Jatropha curcas L. Report no. 158*, Plant Research International, Wageningen.
12. Landell-Mills, N. & Porras, I., 2002. *Silver bullet or fool's gold? A global review of markets for forest environmental services and their impact on the poor*. International Institute for Environment and Development, London.
13. Wunder, S., Engel, S. & Pagiola, S., 2008. Taking stock: a comparative analysis of payments for environmental services programs in developed and developing countries. *Ecological Economics* 65: 834-852.
14. Asquith, N. & Wunder, S. (eds.), 2008. *Payments for watershed services: The Bellagio Conversations*. Fundacion Natura Bolivia, Santa Cruz de la Sierra.
15. Muñoz-Piña, C., Guevara, A., Torres, J.M. & Braña, J., 2008. Paying for the hydrological services of Mexico's forests: analysis, negotiation and results. *Ecological Economics* 65: 725-736.
16. Bruijnzeel, L.A., 2000. Forest hydrology. In *The forests handbook, Part I*, J.C. Evans (ed.), pp. 301-343. Blackwell Scientific, Oxford, U.K.
17. Zhang, L., Dawes, W.R. & Walker, G.R., 2001. The response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at the catchment scale. *Water Resources Research* 37: 701-708.
18. Zhang, L., Hickel, K., Dawes, W.R., Chiew, F.H.S., Western, A.W. & Briggs, P.R., 2004. A rational function approach for estimating mean annual evapotranspiration. *Water Resources Research* 40, W02502, doi: 10.1029/2003WR002710.
19. Kamaruzaman, J., 1991. Effect of tracked and rubber-tyred logging machines on soil physical properties of the Berkelah Forest Reserve, Malaysia. *Pertanika* 14: 1-11.
20. Grip, H., Fritsch, J.M. & Bruijnzeel, L.A., 2004. Soil and water impacts during forest transformation and stabilization to new land use. In *Forests, water and people in the humid*

- tropics, M. Bonell & L.A. Bruijnzeel (eds.), pp. 561-589. Cambridge University Press, Cambridge.
21. Lal, R., 1987. *Tropical ecology and physical edaphology*. J. Wiley, Chichester, U.K.
 22. Bruijnzeel, L.A., 1989. (De)forestation and dry-season flow in the tropics: a closer look. *Journal of Tropical Forest Science* 1: 229-243.
 23. Madduma Bandara, C.M. & Kuruppuarachchi, T.A., 1988. Land-use change and hydrological trends in the upper Mahaweli basin. Paper presented at the *Workshop on Hydrology of Natural and Man-made Forests in the Hill Country of Sri Lanka*, Kandy, October 1988, 18 pp.
 24. Yanda, P.Z. & Munishi, P.K., 2007. *Hydrologic and land use/cover change análisis for the Ruvu River (Uluguru) and Sigi River (East Usambara) watersheds*. Report for WWF-CARE, Dar es Salaam, Tanzania.
 25. Gonzales-Otoya Orbezogo, V.E., 2008. Evaluacion hidrológica para el proyecto CESA de las microcuencas Ayambla-Ahijadero en la cuenca de Jequetepeque. Report for WWF-CARE, Lima, Peru.
 26. Meher-Homji, V.M., 1988. Effects of forests on precipitation in India. In *Forests, climate, and hydrology: Regional impacts*, E.R.C. Reynolds & F.B. Thompson (eds.), pp. 51-77. The United Nations University, Tokyo, Japan.
 27. IPCC, 2007. *Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge.
 28. Oxfeldt-Mortensen, L., 2008. *The cloud mystery*. Documentary. <http://www.thecloudmystery.com>
 29. Kanae, S., Oki, T. & Musiake, K., 2001. Impact of deforestation on regional precipitation over the Indochina Peninsula. *Journal of Hydrometeorology* 2: 51-70.
 30. IPCC, 2003. *Definitions and methodological options to inventory emissions from direct human-induced degradation of forests and devegetation of other vegetation types*. Report, IPCC National Greenhouse Gas Inventories Programme, Kanagawa, Japan.
 31. Kaimowitz, D., 2004. The great flood myth. *The New Scientist*, 19 June 2004, p. 18.
 32. FAO-CIFOR, 2005. *Forests and floods: Drowning in fiction or thriving on facts? Forest Perspectives* 2, RAP Publication 2005/03, FAO, Rome, and CIFOR, Bogor.
 33. Natural Resources International, 2005. *From the mountain to the tap: How land use and water management can work for the rural poor*. NR International, Aylesford, Kent, U.K.
 34. Conan Doyle, A., 1981. A scandal in Bohemia. In: *The adventures of Sherlock Holmes*, Penguin Books, London.
 35. Conan Doyle, A., 1981. Silver Blaze. In: *The Memoirs of Sherlock Holmes*, Penguin Books, London.
 36. Bosch, J.M. & Hewlett, J.D., 1982. A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration. *Journal of Hydrology* 55: 3–23.
 37. Bruijnzeel, L.A., 1997. Hydrology of forest plantations in the humid tropics. In *Management of soil, nutrients and water in tropical plantations forests*, E.K.S. Nambiar & A.G. Brown (Eds.), pp. 125-167. ACIAR, Canberra and CIFOR, Jakarta.
 38. Jackson, R.B., Jobbagy, E.G., Avissar, R., Roy, S.B., Barrett, D.J. *et al.*, 2005. Trading water for carbon with biological carbon sequestration. *Science* 310: 1944–1947.
 39. Waterloo, M.J. Bruijnzeel, L.A., Vugts, H.F. & Rawaqa, T.T., 1999. Evaporation from *Pinus caribaea* plantations on former grassland soils under maritime tropical conditions. *Water Resources Research* 35: 2133-2144.
 40. Matthys, N., Brochet, S., Meunier, M. & Richard, D., 2003. Erosion quantification in the small marly experimental catchments of Draix (Alpes de Haute Provence, France). Calibration of the ETC rainfall-runoff-erosion model. *Catena* 50: 527-548.
 41. Zhang, B., Yang, Y. & Zepp, H., 2004. Effect of vegetation restoration on soil and water erosion and nutrient losses of a severely eroded Plinthudult in southeastern China. *Catena* 57: 77-90.

42. Zhou, G.Y., Morris, J.D., Yan, J.H., Yu, Z.Y. & Peng, S.L., 2001. Hydrological impacts of reafforestation with eucalypts and indigenous species: a case study in southern China. *Forest Ecology and Management*, 167: 209-222.
43. Chandler, D.G. & Walter, M.F., 1998. Runoff responses among common land uses in the uplands of Matalom, Leyte, Philippines. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 41: 1635-1641.
44. Chandler, D.G., 2006. The reversibility of forest conversion impacts on water budgets in tropical karst terrain. *Forest Ecology and Management*, 224: 95-103.
45. ISRIC, 1990. *Global Assessment of the Status of Human-Induced Soil Degradation* (GLASOD). <http://www.iiasa.ac.at/Research/LUC/GAEZ/index.htm>
46. Scott, D.F., Bruijnzeel, L.A. & Mackensen, J., 2004. The hydrological and soil impacts of forestation. In *Forests, water and people in the humid tropics*, M. Bonell & L.A. Bruijnzeel (Eds.), pp. 622-651. Cambridge University Press, Cambridge, U.K.
47. Bai, Z.G., Dent, D.L., Olsson, L. & Schaepman, M.E., 2008. Proxy global assessment of land degradation. *Soil Use and Management* 24: 223-234.
48. Peña-Arancibia, J., 2008. *Large-scale soil hydraulic heterogeneity from temporal variation of near-surface soil water content*. Concept Note, King's College London and FALW-Vrije Universiteit, Amsterdam.
49. Ilstedt, U., Malmer, A., Verbeeten, E. & Murdiyarso, D., 2007. The effect of afforestation on water infiltration in the tropics: a systematic review and meta-analysis. *Forest Ecology and Management*, 251: 45-51.
50. Gilmour, D.A., Bonell, M. & Cassells, D.S., 1987. The effects of forestation on soil hydraulic properties in the Middle Hills of Nepal: a preliminary assessment. *Mountain Research and Development* 7: 239-249.
51. Giambelluca, T.W., 2002. The hydrology of altered tropical forest. *Hydrological Processes* 16: 1665-1669.
52. Bonell, M. & Williams, J. 1986. The two parameters of the Philip infiltration equation: Their properties and spatial and temporal heterogeneity in a red earth of tropical semi-arid Queensland. *Journal of Hydrology* 87: 9-31.
53. Yu, B.F., Rose, C.W., Coughlan, K.J. & Fentie, B., 1997. Plot-scale rainfall-runoff characteristics and modeling at six sites in Australia and South-East Asia. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers* 40: 1295-1303.
54. Stocking, M.J., 2003. Tropical soils and food security. *Science* 302, no. 5649 (21 november 2003).
55. Palm, C.A., Vosti, S.A., Sanchez, P.A. & P. Ericksen (Eds.), 2005. *Slash-and-burn agriculture. The search for alternatives*. Columbia University Press, New York.
56. Wiersum, K.F., 1984. Surface erosion under various tropical agroforestry systems. In *Effects of forest land use on erosion and slope stability*, C.L. O'Loughlin & A.J. Pearce (Eds.), pp. 231-239. IUFRO, Vienna.
57. Linniger, H.P. & W.R.S. Critchley (Eds.). *Where the land is greener: Case studies and analysis of soil and water conservation initiatives worldwide*. CTA, FAO, UNEP and CDE (www.wocat.org).
58. Young, A., 1997. *Agroforestry for soil management*. CABI Publishers, Wallingford, U.K.
59. Wallace, J.S., Young, A. & Ong, C.K., 2004. The potential of agroforestry for sustainable land and water management. In *Forests, water and people in the humid tropics*, M. Bonell & L.A. Bruijnzeel (Eds.), pp. 652-670. Cambridge University Press, Cambridge, U.K.
60. Kimaro, D.N., Poesen, J., Msanya, B.M. & Deckers, J.A., 2008. Magnitude of soil erosion on the northern slope of the Uluguru Mountains, Tanzania: Interrill and rill erosion. *Catena* 75: 38-44.
61. Yu, B.F., 2004. Process-based erosion modeling: promises and progress. In *Forests, water and people in the humid tropics*, M. Bonell & L.A. Bruijnzeel (Eds.), pp. 790-810. Cambridge University Press, Cambridge, U.K.

62. Hewlett, J.D., 1982. Forests and floods in the light of recent investigation. In *Proceedings, Canadian Hydrology Symposium 82*, Fredericton, NB, Canada, pp. 543–559. National Research Council of Canada, Ottawa.
63. Van der Weert, R., 1994. *Hydrological conditions in Indonesia*. Delft Hydraulics, Jakarta, Indonesia.
64. La Marche, J.L. & Lettenmaier, D.P., 2001. Effect of forest roads on flood flows in the Deschutes River, Washington. *Earth Surface Processes and Landforms* 26: 115-134.
65. Bradshaw, C.J.A., Sodi, N.S., Peh, K. S-H. & Brook, B.W., 2007. Global evidence that deforestation amplifies flood risk and severity in the developing world. *Global Change Biology* 13, doi/abs/10.1111/j.1365-2486.2007.01446.x
66. Laurance, W.F., 2007. Forests and floods. *Nature* 449: 409-410.
67. Van Dijk, A.I.J.M., Van Noordwijk, M., Calder, I.R., Bruijnzeel, L.A., Schellekens, J. & Chappell, N., 2008. Forest-flood relation still tenuous – comment on ‘Global evidence that deforestation amplifies flood risk and severity in the developing world’ by C.J.A. Bradshaw, N.S. Sodi, K. S-H. Peh and B.W. Brook. *Global Change Biology* 14, doi 10.1111/j.1365-2486.2008.01708.x.
68. Eltahir, E.A.B. & Bras, R.L., 1996. Precipitation recycling. *Reviews in Geophysics* 34: 367–378.
69. Salati, E., Dall’Olio, Matsui, E. & Gat, J.R., 1979. Recycling of water in the Amazon Basin: an isotopic study. *Water Resources Research* 15: 1250-1258.
70. Nobre, C., Sellers, P. & Shukla, J., 1991. Amazonian deforestation and regional climate change. *Journal of Climate* 4: 957-988.
71. Costa, M.H., 2004. Large-scale hydrological impacts of tropical deforestation. In *Forests, water and people in the humid tropics*, M. Bonell & L.A. Bruijnzeel (Eds.), pp. 590-597. Cambridge University Press, Cambridge, U.K.
72. Roy, S.B. & Avissar, R., 2002. Impact of land use / land cover change on regional hydro-meteorology in Amazonia. *Journal of Geophysical Research* 107, D20, 8037, doi: 10.1029/2001/JD 000662.
73. Malhi, Y. & Phillips, O. (Eds.), 2005. *Tropical forests and global atmospheric change*. Oxford University Press, Oxford, U.K.
74. Werth, D. & Avissar, R., 2002. The local and global effects of Amazon deforestation. *Journal of Geophysical Research* 107, D20, 8087, doi: 10.1029/2001/JD 000717.
75. Zeng, N., Neelin, J.D., Lau, K.M. & Tucker, C.J., 1999. Enhancement of inter-decadal climate variability in the Sahel by vegetation interaction. *Science* 286: 1537-1540.
76. Reij, C.P., 2006. More success stories in Africa’s drylands than often assumed. *Forum sur la Souveraineté Alimentaire, Niamey, 7-10 november 2006*. ROPPA, Ouagadougou, Burkina Faso.
77. Makarieva, A.M. & Gorshkov, V.G., 2007. Biotic pump of atmospheric moisture as driver of the hydrological cycle on land. *Hydrology and Earth System Science* 11: 1013-1033.
78. Meesters, A.G.C.A., Dolman, A.J. & Bruijnzeel, L.A., 2008. Commentary on “Biotic pump of atmospheric moisture as driver of the hydrological cycle on land” by Makarieva & Gorshkov 2007. *Hydrology and Earth System Science* (posted on Discussion Forum, November 2008).
79. Malkus, J.S., 1955. The effects of a large island upon the trade-wind air stream. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 81: 538-550.
80. Van der Molen, M.K., Dolman, A.J., Waterloo, M.J. & Bruijnzeel, L.A., 2006. Climate is affected more by maritime than by continental land use change: a multiple-scale analysis. *Global and Planetary Change* 54: 128-149.
81. Nair, U.S., Lawton, R.O, Welch, R.M. & Pielke, R.A., 2003. Impact of land use on Costa Rican tropical montane cloud forests: Sensitivity of cumulus cloud field characteristics to lowland deforestation. *Journal of Geophysical Research* 108, D7: 4206-4218.
82. Scatena, F.N. & Larsen, M., 1991. Physical aspects of hurricane Hugo in Puerto Rico. *Biotropica* 23: 317-323.

83. Bruijnzeel, L.A., 2004. Tropical montane cloud forest: a unique hydrological case. In *Forests, water and people in the humid tropics*, M. Bonell & L.A. Bruijnzeel (Eds.), pp. 462-483. Cambridge University Press, Cambridge, U.K.
84. Zadroga, F., 1981. The hydrological importance of a montane cloud forest area of Costa Rica. In *Tropical agricultural hydrology*, R. Lal & E.W. Russell (Eds.), pp. 59-73. J. Wiley, New York.
85. Bruijnzeel, L.A. & Hamilton, L.S., 2000. Decision time for cloud forests. *IHP Humid Tropics Programme Series* no. 13, IHP-UNESCO, Paris, IUCN-NL, Amsterdam and WWF International, Gland, Switzerland.
86. Hafkenscheid, R.L.L.J., 2000. *Hydrology and biogeochemistry of montane rain forests of contrasting stature in the Blue Mountains of Jamaica*. Proefschrift, Vrije Universiteit, Amsterdam.
87. Van der Molen, M.K., 2002. *Meteorological impacts of land use change in the maritime tropics*. Proefschrift, Vrije Universiteit, Amsterdam.
88. Holwerda, F., 2005. *Water and energy budgets of rain forests along an elevation gradient under maritime tropical conditions*. Proefschrift, Vrije Universiteit, Amsterdam.
89. Bruijnzeel, L.A. (compiler), 2006. *Hydrological impacts of converting tropical montane cloud forest to pasture, with initial reference to northern Costa Rica*. Final Technical Report, DFID-FRP Project no. R7991. Vrije Universiteit Amsterdam and Forestry Research Programme of the U.K. Department for International Development, Aylesford.
90. Mulligan, M. & Burke, S.M., 2005. *FIESTA: Fog interception for the enhancement of streamflow in tropical areas. Final Technical Report of AMBIOTEK/ King's College London contributions*. <http://www.ambiotek.com/fiesta>.
91. Calamini, G. & Salbitano, F., 1998. Crown architecture and fog-plant relationship in a tree plantation trial in south Peru. In *First International Conference on Fog and Fog Collection*, R.S. Schemenauer & H.A. Bridgman (Eds.), pp. 489-492. IDRC, Ottawa.
92. Dawson, T.E., 1998. Fog in the California redwood forest: ecosystem inputs and use by plants. *Oecologia* 117: 476-485.
93. Aravena, R., Suzuki, O. & Pollastri, A., 1989. Coastal fog and its relation to ground-water in the IV region of northern Chile. *Chemical Geology* 79: 83-91.
94. Aide, T.M. & Grau, H.R., 2004. Globalization, migration, and Latin American ecosystems. *Science* 305: 1915-1916.
95. Vanacker, V., Von Blanckenburg, F., Govers, G., Molina, A., Poesen, J. *et al.*, 2007. Restoring dense vegetation cover can slow mountain erosion to near natural benchmark levels. *Geology* 35: 303-306.
96. Wilson, E.O., 2002. *The future of life*. Alfred A. Knopf, New York.
97. Beck, E., Bendix, J., Kottke, I., Makeschin, F. & Mosandl, R. (Eds.), 2008. *Gradients in a tropical mountain ecosystem of Ecuador. Ecological Studies* 198. Springer Verlag, Berlin.
98. Steffan-Dewenter, I., 2008. *Kilimanjaro ecosystems under global change: Linking biodiversity, biotic interactions and biogeochemical ecosystem processes*. Pre-proposal for the funding of a Research Unit submitted to the Deutsche Forschungsgemeinschaft, June 2008.
99. Mansourian, S., Vallauri, D. & Dudley, N., 2005. *Forest restoration in landscapes : beyond planting trees*. Springer, New York.
100. Perrot-Maître, D., 2006. The Vittel payments for ecosystem services: a 'perfect' PES case? *Project Paper* no. 3, IIED, London.