

Diss. ETH No. 20020

Vegetation-mediated impacts of trends in climate forcing on land hydrology

A dissertation submitted to
ETH ZURICH

for the degree of
DOCTOR OF SCIENCES

presented by

Paulo José da Silva Costa de Oliveira
M.Sc., University of San Francisco, USA
born on 23 April 1967
citizen of Portugal

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Sonia I. Seneviratne, examiner
Prof. Dr. Ulrike Lohmann, co-examiner
Dr. Edouard L. Davin, co-examiner
Dr. Christian H. Reick, co-examiner

Zurich 2012

Abstract

Human-induced changes to the climate system have brought about unprecedented impacts on the hydrologic cycle, which are expected to intensify in the coming future. External forcings act upon the various components of this complex system through non-linear interactions with the land surface at different spatio-temporal scales. The task of fully understanding these processes in order to better predict, and prepare for, the current and future development of the water cycle is challenging, given the constraints of a comprehensive assessment of its physical behaviour. Many advances have been made in the detection, characterization, and ability to predict the response of the water cycle as a result of changes to atmospheric forcings, but large uncertainties still remain. The study of land hydrology using current state-of-the-art land surface models can provide valuable insights toward the understanding of the involved biophysical processes, and help elucidate the ways in which forcing trends can affect the relevant components of the water cycle. This thesis uses land-surface modeling experiments and comparisons with observations to assess some of the effects of atmospheric forcing trends on land hydrologic processes, in addition to providing insights into the possible limitations of the datasets and simulation methodology.

Chapter 1 provides an overview of the current knowledge in the related fields in climate science that are relevant to, and provide the theoretical basis for, the research presented in this thesis. It includes a description of some recent findings with respect to the components of the global water and energy cycles and their interactions within the climate system. It also introduces the modeling tools and methodologies on which the subsequent chapters rely.

In Chapter 2, the sensitivity of the CLM land-surface model and of its output hydrologic variables to changes in global radiation is investigated in detail. Simulated trends in evapotranspiration and runoff in the second half of the 20th century are derived, and the potential direct and indirect effects of radiation trends, and their relative importance, are ascertained. Close attention is also paid to how changes to the partitioning of incoming solar radiation between its direct and diffuse fractions may affect the components of the water cycle. There, it is shown that the modeled hydrologic cycle response to the imposed radiation changes is relatively strong globally, and particularly in the tropics, but weak

in regions with soil moisture-limited evapotranspiration regime. In Europe and the Eastern U.S. the imposed solar dimming signal leads to an evapotranspiration reduction of 5% of the mean, and an enhancement of runoff by equal percentage, while the imposed brightening elicits a proportional response. The simulated impact of higher diffuse radiation fraction suggests mostly an increase of evapotranspiration in the tropics of 3% of mean due to increased photosynthesis from shaded leaves, but smaller opposite effects elsewhere due to the compensatory effect from lower ground evaporation. The runoff trend resulting from the imposed radiation/aerosols effect is of the same sign and approximate relative magnitude as those from other studies for other potential drivers of runoff change such as climate, CO₂, and land use.

In Chapter 3, recent hydrological variability and trends for annual time series of streamflow in Europe are investigated for several datasets: 1) near-natural small catchment streamflow observations integrated over large river basins; 2) river basin streamflow measurements at downmost stations from the GRDC dataset; 3) and simulations with the CLM land-surface model driven with state-of-the-art forcing datasets. In addition, the mean of a multi-model hydrologic study featuring the most commonly used latest-generation models is used for the evaluation of variability of runoff in the investigated basins. The CLM simulations agree with the observations reasonably well, especially in terms of runoff variability, although regional discrepancies exist mostly in the drier Southwestern European basins. Runoff from integrated near-natural catchments can be valuable for the validation of model-simulated runoff, as it is a good proxy for continental-scale basin behaviour and is sensitive to radiation forcing trends, especially in Western and East-central European river basins. The poorer performance of the simulations driven with one of the forcing datasets highlights the importance of atmospheric forcing to accurately simulate terrestrial hydrology. Despite the differences in scale and the large uncertainty expressed by an overall poor statistical significance level, near-natural streamflow trend behaviour and changes mostly show good agreement with GRDC observations and simulated data. The overall consistency between the integrated near-natural catchment and whole-basin GRDC data relativizes the possible impacts of scale, altitude or human water use on runoff in the investigated river basins.

Chapter 4 analyses the impacts of model resolution, atmospheric forcing, and the choice of land-surface model on the means, variability, and trends in land hydrology, globally and regionally. Offline land-surface model simulations with the CLM land-surface model are performed at two different resolutions

and driven with two different forcing datasets, including a recently developed product from the WATCH project. The results are compared to WATCH simulations computed with six different land-surface and global hydrologic models. The results reveal that the WATCH-driven CLM simulation generally lies within the WATCH multi-model spread and that the choice of forcing dataset can substantially affect the simulations, at least to the same order of magnitude as the model choice. Overall mean patterns in runoff and evapotranspiration reflect the distribution of precipitation from the forcing. Simulations driven with the same forcing exhibit similar trend patterns and magnitude, suggesting that the decadal variability of the water cycle components is more sensitive to differences in the forcing datasets than to differences in model parameterizations. For the inter-annual variability of the simulated processes, however, both the applied forcings and model parameterizations appear relevant. The means and trends in radiation forcing are well correlated with the multi-model ensemble runoff, but neither of the forcing datasets incorporate observed radiation brightening trends, and thus some of the simulated trends may be erroneous. Lastly, it is observed that in relative terms model resolution plays a modest role for simulation uncertainty, at least in the absence of higher forcing resolution.

Chapter 5 summarizes the main conclusions of this thesis, namely that land surface processes and their impacts on the water cycle are substantially affected by atmospheric forcing trends. Solar radiation impacts evapotranspiration and runoff in significant ways, and its partitioning between direct and diffuse fractions must also be taken into account. It is additionally identified that runoff observations from near-natural catchments can prove valuable for the validation of simulated runoff, as they are found to be good proxies for continental-scale basin behaviour and are sensitive to forcing trends. Lastly, the adequate simulation of land-surface hydrology depends on the choice of atmospheric forcing and land-surface model, which may bias the means, variability, and trends at the global and regional levels. Hence, this study shows both the potential and limitations of land surface models for assessing land hydrological trends, and especially highlights the necessity for the improvement of atmospheric forcing datasets to assess long-term changes in the land water cycle. It additionally shows the strong regional variations in the importance of respective atmospheric drivers, which can generally be related to variations in hydrological regime.

Résumé

Les activités humaines ont entraîné des impacts sans précédents sur le système climatique, et en particulier sur le cycle hydrologique, qui devraient s'intensifier à l'avenir. Les forçages externes agissent sur les différentes composantes de ce système complexe à travers d'interactions non-linéaires avec la surface du sol à différentes échelles spatio-temporelles. La tâche consistant à améliorer notre compréhension des processus dans le but de mieux prévoir et se préparer à l'évolution actuelle et future du cycle de l'eau est difficile, étant donné les contraintes d'une évaluation exhaustive de son comportement physique. De nombreux progrès ont été réalisés dans la détection, la caractérisation et la capacité à prédire la réponse du cycle de l'eau résultant de changements de forçages atmosphériques, mais de grandes incertitudes existent encore. L'étude de l'hydrologie terrestre à l'aide de modèles de surface les plus récents permet d'obtenir des indications précieuses pour la compréhension des processus biophysiques impliqués, et d'aider à élucider la manière dont les tendances dans le forçage peuvent affecter les composants principaux du cycle de l'eau. Cette thèse se base sur des expériences de modélisation de la surface terrestre et sur des comparaisons avec les observations pour évaluer certains effets des tendances dans les forçages atmosphériques sur les processus hydrologiques terrestres, à plus de donner des aperçus sur les limites possibles des ensembles de données et de la méthodologie des simulations.

Le chapitre 1 propose une vue d'ensemble des connaissances actuelles dans les domaines des sciences du climat pertinentes et qui fournissent la base théorique pour la recherche présentée dans cette thèse. Il comprend une description de résultats récents concernant les composants du cycle de l'eau et de l'énergie mondiale et leurs interactions au sein du système climatique. Les outils de modélisation et les méthodologies sur lesquelles reposent les chapitres suivants sont introduits.

Dans le chapitre 2, la sensibilité aux changements de rayonnement global du modèle de la surface terrestre CLM et de ses variables hydrologiques est étudiée en détail. Les tendances simulées de l'évapotranspiration et l'écoulement durant la seconde moitié du 20ème siècle sont calculées et les effets potentiels directs et indirects des tendances de rayonnement, ainsi que leur importance relative, sont évaluées. Une attention particulière est également accordée à la façon dont les modifications du

partitionnement du rayonnement solaire incident entre la fraction directe et la fraction diffuse peut affecter les composants du cycle de l'eau. Il est démontré que la réponse du cycle hydrologique modélisé suivant les changements de rayonnement solaire imposés est relativement forte au niveau global et en particulier dans les tropiques, mais faible dans les régions où le régime d'évapotranspiration du sol est limité par l'humidité. En Europe et dans l'Est des Etats-Unis, le signal d'atténuation solaire imposé conduit à une réduction de l'évapotranspiration de 5% de la moyenne et à une croissance de l'écoulement en pourcentage égal, tandis que l'éclaircissement imposé suscite une réponse proportionnelle au signal du forçage. L'impact de la simulation d'une fraction plus grande de rayonnement diffus suggère surtout une augmentation de l'évapotranspiration dans les tropiques de 3% de la moyenne en raison de la photosynthèse accrue provenant des feuilles ombragées, mais les effets opposés sont plus limités ailleurs à cause de l'effet compensatoire de l'évaporation du sol. La tendance de l'écoulement résultant de l'effet du rayonnement et des aérosols imposés est du même signe et de même magnitude relative approximativement que celle trouvée dans autres études sur d'autres facteurs potentiels de changement d'écoulement, comme le climat, le CO₂ et l'occupation des sols.

Dans le chapitre 3, les tendances et la variabilité hydrologique récentes des séries temporelles annuelles d'écoulement en Europe sont étudiées pour plusieurs ensembles de données: 1) des observations des bassins à petite échelle non-perturbés, intégrés à l'échelle des bassins continentaux; 2) des mesures d'écoulement au niveau des bassins continentaux des stations les plus en aval de l'ensemble de données de GRDC; 3) et des simulations avec le modèle de surface terrestre CLM forcées par des ensembles de données de forçage atmosphérique les plus récents. De plus, la moyenne d'une étude hydrologique multi-modèles avec les modèles de dernière génération les plus courants est utilisée pour l'évaluation de la variabilité de l'écoulement dans les bassins analysés. Les simulations avec CLM sont en raisonnablement bon accord avec les observations, en particulier en terme de variabilité de l'écoulement, même si des disparités régionales existent plutôt dans les bassins secs du sud-ouest européen. L'écoulement des petits bassins non-perturbés intégrés à l'échelle des bassins continentaux peut être précieux pour la validation de l'écoulement simulé par le modèle, car il est un bon indicateur du comportement du bassin à l'échelle continentale, et est sensible aux tendances du forçage radiatif, en particulier dans les bassins hydrographiques de l'Europe de l'ouest, ainsi que de l'Europe Centrale et de l'est. La performance plus faible des simulations forcées avec un des ensembles de données de forçage atmosphérique met en évidence l'importance du forçage atmosphérique pour la simulation des

processus hydrologiques terrestres. Malgré les différences d'échelle et la grande incertitude révélée par des faibles niveaux de signification statistique, le comportement et le changement des tendances de l'écoulement des petits bassins non-perturbés montrent pour la plupart un bon accord avec les observations de GRDC et les données simulées. La cohérence globale entre les observations des petits bassins non-perturbés intégrés et les données de GRDC à l'échelle des bassins continentaux relativise les effets possibles des variations d'échelle, d'altitude ou d'utilisation de l'eau dans les bassins étudiés.

Le chapitre 4 analyse les impacts de la résolution du modèle, du forçage atmosphérique, et du choix de modèle de surface terrestre sur les moyennes, la variabilité et les tendances en matière d'hydrologie terrestre, globalement et régionalement. Les simulations avec le modèle de surface terrestre Community Land Model (CLM) sont effectuées à deux résolutions différentes et conduites avec deux différents ensembles de données de forçage, y compris un produit développé récemment par le projet WATCH. Les résultats sont comparés aux simulations de WATCH calculées avec six modèles de surface terrestre et hydrologiques différents. Les résultats révèlent que la simulation de CLM forcée par WATCH se trouve en général dans la marge de fluctuation de ceux de l'ensemble multi-modèle WATCH et que le choix de forçage atmosphérique peut affecter significativement les simulations, au moins dans le même ordre de grandeur que le choix du modèle. En général, les comportements moyens de l'écoulement et de l'évapotranspiration reflètent la répartition des précipitations due au forçage. Les simulations conduites avec la même forçage manifestent les mêmes modes de comportement dans les tendances et l'ampleur, ce qui suggère que la variabilité décennale des composantes du cycle de l'eau est plus sensible aux différences dans les ensembles de données forçantes qu'aux différences dans les paramétrisations du modèle. Pour la variabilité inter-annuelle des processus simulés, toutefois, à la fois les forçages appliqués et les paramétrisations du modèle semblent importants. Les moyennes et les tendances de forçage radiatif sont bien corrélés avec l'écoulement de l'ensemble multi-modèles, mais aucun des ensembles de données incorpore les tendances d'éclaircissement de rayonnement observés, et donc quelques-unes des tendances simulées peuvent être potentiellement erronées. Enfin, il est observé qu'en termes relatifs, la résolution du modèle joue un rôle modeste dans l'incertitude des simulations, du moins en l'absence de résolutions de forçage plus hautes.

Le chapitre 5 résume les principales conclusions de cette thèse, à savoir que les processus de surface des terres et leurs impacts sur le cycle de l'eau sont sensiblement affectés par les tendances du forçage

atmosphérique. De plus, le rayonnement solaire affecte l'évapotranspiration et l'écoulement de façon significative et sa répartition entre les fractions directe et diffuse doit également être prise en compte. Les résultats montrent par ailleurs que les observations de l'écoulement provenant des bassins non-perturbés peuvent se révéler précieuses pour la validation de l'écoulement simulé, car elles se trouvent être de bons indicateurs pour le comportement du bassin à l'échelle continentale et sont sensibles aux tendances du forçage. Enfin, la simulation adéquate de l'hydrologie de la surface terrestre dépend du choix de forçage atmosphérique et du modèle de surface terrestre, ce qui peut biaiser les moyennes, la variabilité et les tendances aux niveaux global et régional. Ainsi, cette étude montre à la fois le potentiel et les limites des modèles de surface terrestre pour évaluer les tendances hydrologiques terrestres et souligne en particulier la nécessité pour l'amélioration des ensembles de données de forçage atmosphériques pour évaluer à long terme les changements dans le cycle de l'eau sur terre. Il est aussi démontré que les variations régionales dans l'importance des drivers atmosphériques respectifs, qui peuvent généralement être liées aux variations de régime hydrologique, sont fortes.