

DISS. ETH NO. 19415

**CARBON DIOXIDE AND WATER VAPOUR FLUXES  
OF TROPICAL PASTURE AND AFFORESTATION:  
SEASONAL VARIATIONS OF NET ECOSYSTEM EXCHANGE  
AND CARBON SEQUESTRATION POTENTIALS**

A dissertation submitted to

**ETH ZURICH**

for the degree of

Doctor of Sciences

presented by

**SEBASTIAN WOLF**

Dipl.-Geogr., Dresden University of Technology

born 25 December 1978

of German nationality

Prof. Dr. Nina Buchmann, examiner

PD Dr. Werner Eugster, co-examiner

Prof. Dr. Nicolas Gruber, co-examiner

**2010**

---

## Abstract

Tropical forest ecosystems play an important role in regulating the global climate, yet deforestation and land-use change indicate that the tropical carbon and water cycle are increasingly influenced by agroecosystems and pastures. It is not yet fully understood how the carbon and water cycle in the tropics respond to land-use change, particularly in managed ecosystems such as pasture and afforestation. Therefore, it is crucial to investigate the biosphere-atmosphere interactions of these alternative land-use types in the tropics. This thesis aims to improve our understanding of the interactions between land use and climate on ecosystem carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) and water vapour (H<sub>2</sub>O) fluxes of tropical pasture and native tree species afforestation, with the main focus on seasonal variations and carbon sequestration potentials.

Comparative eddy covariance measurements of ecosystem CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O fluxes were performed in a tropical C<sub>4</sub> pasture and adjacent afforestation with native tree species in Sardinilla (Panama) from 2007 to 2009. Pronounced seasonal variations were observed in gross primary production (GPP), total ecosystem respiration (TER) and net ecosystem exchange (NEE), which were closely related to radiation, soil moisture and C<sub>3</sub> *versus* C<sub>4</sub> plant physiology. The pasture ecosystem was more susceptible to water limitations during the dry season and thus, the conversion from pasture to afforestation reduced seasonal variations in GPP, TER and NEE. Furthermore, El Niño Southern Oscillation (ENSO) events and associated increases in precipitation variability were found to have a strong impact on seasonal variations of CO<sub>2</sub> fluxes, particularly on the pasture ecosystem. Soil respiration contributed about half of TER during nighttime, with only small differences between ecosystems or seasons. Temperature was found to have no effect on ecosystem and soil respiration in Sardinilla.

Annual GPP was higher in the pasture (2345 g C m<sup>-2</sup> yr<sup>-1</sup>) than in the afforestation ecosystem (2082 g C m<sup>-2</sup> yr<sup>-1</sup>) but overall lower than reported from tropical forests. Substantial carbon sequestration was found in the afforestation (-442 g C m<sup>-2</sup> yr<sup>-1</sup>, negative values denote ecosystem carbon uptake) during 2008, which was in good agreement with biometric observations (-450 g C m<sup>-2</sup> yr<sup>-1</sup>) revealing a total carbon stock of 2122 g C m<sup>-2</sup> in above and belowground biomass. Furthermore, estimates for 2007 and 2009 indicated also strong carbon uptake by the afforestation ecosystem. In contrast, the pasture ecosystem was a similarly strong carbon source in 2008 and 2009 (261 g C m<sup>-2</sup>) and carbon losses were predominantly associated with high stocking densities and periodical overgrazing. The carbon losses from the pasture originated primarily from soil organic matter. Stable isotope (δ<sup>13</sup>C) analysis indicated rapid carbon turnover following the land conversion from C<sub>4</sub> pasture to C<sub>3</sub> afforestation. The soil carbon stock (0–100 cm) in the pasture (5350 g C m<sup>-2</sup>) was significantly lower than in the afforestation (7640 g C m<sup>-2</sup>) suggesting differences in land management before the establishment of the afforestation in 2001. The afforestation of tropical pasture only

marginally affected annual ecosystem-scale evapotranspiration (ET; 1114 vs. 1034 mm yr<sup>-1</sup> in 2008), but reduced the seasonal variations in ET and largely increased the soil infiltration potential. About half of the annual precipitation was returned to the atmosphere by ET from both ecosystems.

In summary, this thesis presents the first multi-year eddy covariance measured CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O fluxes for tropical pasture and afforestation in Panama, is one of the very few ecosystem flux studies from Central America, and emphasizes the significance to investigate alternative land-use types in the tropics. The results underline the substantial carbon sequestration potential of tropical afforestation and show the impact of overgrazing on carbon losses from a pasture. Moreover, the land-use change from pasture to afforestation can reduce the seasonal variations of CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O fluxes and enhance the ecosystem resilience to seasonal drought.

---

## Zusammenfassung

Tropische Waldökosysteme spielen eine wichtige Rolle bei der Regulierung des globalen Klimas. Abholzung und Landnutzungsänderungen haben zur Folge, dass der tropische Kohlenstoff- und Wasserkreislauf zunehmend von Agrarökosystemen und Weiden geprägt wird. Es ist noch nicht vollständig geklärt, welche Auswirkungen Landnutzungsänderungen auf den tropischen Kohlenstoff- und Wasserkreislauf haben. Dies gilt insbesondere für bewirtschaftete Ökosysteme wie Weiden und Aufforstungen. Daher ist es unerlässlich, die Wechselwirkungen zwischen Biosphäre und Atmosphäre dieser alternativen Landnutzungsarten in den Tropen zu untersuchen. Das Ziel dieser Arbeit war es, die Wechselwirkungen zwischen Landnutzung und Klima zu analysieren und ihren Einfluss auf die Ökosystemflüsse von Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) und Wasserdampf (H<sub>2</sub>O) in tropische Weiden und Aufforstungen besser zu verstehen. Der Schwerpunkt lag dabei auf saisonalen Schwankungen und dem Potential der Kohlenstoffspeicherung. Auf einer tropischen C<sub>4</sub>-Weide und einer angrenzenden Aufforstung mit einheimischen Baumarten in Sardinilla (Panama) wurden von 2007 bis 2009 vergleichende Messungen dieser Ökosystemflüsse mit der Eddy-Kovarianz-Methode durchgeführt. Ausgeprägte saisonale Schwankungen in der Primärproduktion (GPP), der Ökosystematmung (TER) und des Netto-Ökosystem-Austausches (NEE) standen in einem starken Zusammenhang mit der Einstrahlung, der Bodenfeuchte sowie der C<sub>3</sub>/C<sub>4</sub> Pflanzenphysiologie. Während der Trockenzeit war das Weide-Ökosystem empfindlicher gegenüber Wassermangel. Daher verringerten sich mit der Landnutzungsänderung von einer Weide zu einer Aufforstung die saisonalen Schwankungen von GPP, TER und NEE. Darüber hinaus hatten Ereignisse der El Niño Southern Oscillation (ENSO) und die damit verbundene Zunahme der Niederschlags-Variabilität einen starken Einfluss auf die saisonalen Schwankungen der CO<sub>2</sub>-Flüsse, insbesondere im Weide-Ökosystem. Die Bodenatmung machte etwa die Hälfte der gesamten Ökosystematmung aus, wobei die Unterschiede zwischen beiden Ökosystemen und zwischen den Jahreszeiten gering waren. Es wurden keine Temperaturabhängigkeiten der nächtlichen Boden- und Ökosystematmung in Sardinilla festgestellt.

Die jährliche Primärproduktion war auf der Weide (2345 g C m<sup>-2</sup> yr<sup>-1</sup>) höher als in der Aufforstung (2082 g C m<sup>-2</sup> yr<sup>-1</sup>), jedoch insgesamt niedriger als in tropischen Regenwäldern. Die Aufforstung ging im Jahr 2008 mit einer starken Kohlenstoffsinke einher (-442 g C m<sup>-2</sup> yr<sup>-1</sup>). Forstinventardaten zeigten eine gute Übereinstimmung mit den Flussmessungen (-450 g C m<sup>-2</sup> yr<sup>-1</sup>) und quantifizierten mit 2122 g C m<sup>-2</sup> den gesamten Kohlenstoffspeicher in Form von unter- und oberirdischer Biomasse. Abschätzungen für 2007 und 2009 zeigten ebenfalls eine starke Kohlenstoffaufnahme durch die Aufforstung. Die Weide war in den Jahren 2008 und 2009 eine starke Kohlenstoffquelle (261 g C m<sup>-2</sup>), wobei die Kohlenstoffverluste im Wesentlichen durch eine starke Beweidung und regelmässige Überweidung bedingt waren.

Die Kohlenstoffverluste auf der Weide stammten hauptsächlich aus der organischen Bodensubstanz. Die Auswertung von stabilen Isotopen ( $\delta^{13}\text{C}$ ) zeigte eine sehr schnelle Verarbeitung des Kohlenstoffs im Boden während der Landnutzungsänderung von einer  $\text{C}_4$ -Weide zu einer  $\text{C}_3$ -Aufforstung. Der Bodenkohlenstoff-Speicher (0–100 cm) war in der Weide signifikant niedriger ( $5350 \text{ g C m}^{-2}$ ) als in der Aufforstung ( $7640 \text{ g C m}^{-2}$ ). Dies deutet auf unterschiedliche Bewirtschaftungen beider Flächen vor dem Beginn der Aufforstung im Jahre 2001 hin. Die Aufforstung der tropischen Weide hatte kaum einen Einfluss auf die jährliche Verdunstung ( $1114 \text{ vs. } 1034 \text{ mm yr}^{-1}$  in 2008), verringerte jedoch ihre saisonalen Schwankungen. Das Infiltrations-Potential des Bodens wurde hingegen stark erhöht. Die Verdunstung transportierte ungefähr die Hälfte der jährlichen Niederschlagsmenge zurück in die Atmosphäre.

Diese Arbeit präsentiert die ersten mehrjährigen Messungen für tropische Weiden und Aufforstungen mit der Eddy-Kovarianz-Methode in Panama. Sie ist eine der wenigen Ökosystem-Flussmessungen in Zentralamerika und betont die Notwendigkeit der Untersuchung von alternativen Landnutzungstypen in den Tropen. Die Ergebnisse bestätigen das erhebliche Potential der Kohlenstoffspeicherung in tropischen Aufforstungen und verdeutlichen den starken Einfluss von Überweidung auf die Kohlenstoffverluste einer Weide. Darüber hinaus zeigen die Ergebnisse, dass diese Landnutzungsänderung die saisonalen Schwankungen der  $\text{CO}_2$ - und  $\text{H}_2\text{O}$ -Ökosystemflüsse verringert und die Widerstandsfähigkeit gegenüber jahreszeitlicher Trockenheit verbessert.