

Deutsche Zusammenfassung

Slash and Char as Alternative to Slash and Burn

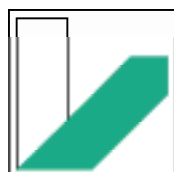


Soil charcoal amendments maintain soil fertility and establish a carbon sink

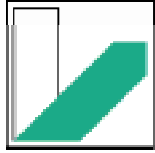
Dissertation

Faculty of Biology, Chemistry and Geosciences
University of Bayreuth, Germany

Christoph Steiner



UNIVERSITÄT
BAYREUTH



UNIVERSITÄT
BAYREUTH



Embrapa

Amazônia Ocidental

Slash and Char as Alternative to Slash and Burn –
soil charcoal amendments maintain soil fertility
and establish a carbon sink

Dissertation

Faculty of Biology, Chemistry and Geosciences
University of Bayreuth, Germany

Compiled by Christoph Steiner

Institute of Soil Science and Soil Geography, University of Bayreuth, D-95440
Bayreuth, Germany (email: Christoph.Steiner@uni-bayreuth.de)

Supervisor: Univ.Prof. Dr. Wolfgang Zech

Institute of Soil Science and Soil Geography, University of Bayreuth, D-95440
Bayreuth, Germany (email: Wolfgang.Zech@uni-bayreuth.de)



Austrian Academy of Sciences

Bayreuth, 25. 11. 2006

Table of Co-authors and their contributions

Contributor	Chapter	Contribution
Christoph Steiner William I. Woods	I	Field work, data and sample collection, manuscript preparation Measurement of total nutrient contents, comments on the manuscript
Wenceslau G. Teixeira Wolfgang Zech		Brazilian project partner, providing EMBRAPA research facilities Project leader SHIFT ENV 45, Budget acquisition and advices
Sundari Narayan Swami	II	Field work, data collection, data analyzes and manuscript preparation
Christoph Steiner		Help and advices for the field work, data analyzes and manuscript preparation
Wenceslau G. Teixeira Johannes Lehmann		Help and advices for the field work Advices for the field work and comments on the manuscript
Christoph Steiner Wenceslau G. Teixeira Wolfgang Zech	III	Data collection, observations and preparation of the book chapter Brazilian project partner, providing EMBRAPA research facilities Project leader SHIFT ENV 45, Budget acquisition and advices
Christoph Steiner	IV	Study setup, respiration measurements, data collection and analyses, manuscript preparation
Keshav C. Das		Comments and contribution to the manuscript
Marcos Garcia Bernhard Förster		Brazilian project partner, providing EMBRAPA research facilities Introduction into IRGA SIR measurements, comments on the manuscript and data analyses
Wolfgang Zech		Project leader SHIFT ENV 45, Budget acquisition and advices
Christoph Steiner	V	Study setup, data collection, respiration measurement and manuscript preparation
Marcos Garcia Wolfgang Zech		Brazilian project partner, providing EMBRAPA research facilities Project leader SHIFT ENV 45, Budget acquisition and advices
Christoph Steiner	VI	Experimental setup, field work, data collection, sample analyses, manuscript preparation
Wenceslau G. Teixeira Johannes Lehmann		Brazilian project partner, providing EMBRAPA research facilities Advices for the study setup and data collection, comments on the manuscript
Thomas Nehls		Experimental setup, field work, data collection, sample analyses (first crop)
Jeferson L. V. de Macedo		Brazilian project partner, providing EMBRAPA research facilities (first crop)
Winfried E.H. Blum Wolfgang Zech		Austrian Supervisor, Budget acquisition (ÖAW grant) Project leader SHIFT ENV 45, Budget acquisition, advices and comments on the manuscript
Christoph Steiner	VII	Study setup, respiration measurements, data collection and analyses, book chapter preparation
Wenceslau G. Teixeira Johannes Lehmann		Brazilian project partner, providing EMBRAPA research facilities Advices for the field work and study setup, comments on the manuscript
Wolfgang Zech		Project leader SHIFT ENV 45, Budget acquisition and advices
Christoph Steiner	VIII	Study setup, sample collection, data analyses and manuscript

Bruno Glaser		preparation Sample analyzes (¹⁵ N), advices for data analyses and manuscript preparation
Wenceslau G. Teixeira		Brazilian project partner, providing EMBRAPA research facilities
Johannes Lehmann		Advices for the field work and study setup
Winfried E.H. Blum		Austrian Supervisor, Budget acquisition (ÖAW grant)
Wolfgang Zech		Project leader SHIFT ENV 45, Budget acquisition and advices
Julie Major		Weed cover assessment, data analyses and preparation of the manuscript
Christoph Steiner	IX	Study setup, soil nutrient contents, comments on the manuscript
Antonio DiTommaso		Advices for field work and comments on the manuscript
Newton P.S. Falcão		Brazilian project partner, providing INPA research facilities
Johannes Lehmann		Advices for field work and comments on the manuscript
Christoph Steiner		Study setup (banana), soil respiration measurements, data analyses and manuscript preparation
Murilo R. de Arruda	X	Study setup, soil nutrient contents (guarana)
Wenceslau G. Teixeira		Study setup, soil nutrient contents (banana)
Wolfgang Zech		Project leader SHIFT ENV 45, Budget acquisition and advices
Christoph Steiner		Study setup, data collection and analyses, manuscript preparation
Wenceslau G. Teixeira	XI	Study setup, data collection, soil physics
Wolfgang Zech		Project leader SHIFT ENV 45, Budget acquisition, advices and comments on the manuscript

Acknowledgements

In addition to co-authors and those mentioned in the chapters I am grateful for my parent's support. They facilitated frequent traveling and extended stays in Brazil. Friends and colleagues in Brazil, Germany, Austria and the USA made my time both productive and enjoyable. In particular I thank Jago Birk and Dr. Bruno Glaser for their accommodation in Bayreuth and their expertise. Dr. Winfried E.H. Blum supported grant applications and candidly offered institute facilities. Dr. Bill Woods, Dr. Ilse Ackerman and Dr. Ted Feldpausch kindly did the native speaker revision.

My work with Eprida supported congress attendance and meetings with charcoal researchers in China, Japan, India, Brazil and the USA. A contribution of the Austrian Research Foundation enabled me to participate at the Energy and Agricultural Carbon Utilization Congress, Athens, Georgia, USA, 2004 and the 18th WCSS in Philadelphia, Pennsylvania, USA, 2006.

Table of contents

ABSTRACT	Fehler! Textmarke nicht definiert.
Introduction	Fehler! Textmarke nicht definiert.
Objectives and Scope	Fehler! Textmarke nicht definiert.
Most important research findings	Fehler! Textmarke nicht definiert.
Conclusions	Fehler! Textmarke nicht definiert.
ZUSAMMENFASSUNG	10
Einleitung	10
Zielsetzungen und Arbeitsumfang	10
Die wichtigsten Forschungsergebnisse	11
Schlussfolgerungen	14
EXTENDED SUMMARY	Fehler! Textmarke nicht definiert.
Introduction	Fehler! Textmarke nicht definiert.
Objectives	Fehler! Textmarke nicht definiert.
Material and Methods	Fehler! Textmarke nicht definiert.
<i>Study Locations</i>	Fehler! Textmarke nicht definiert.
<i>Experimental Setups and Designs</i>	Fehler! Textmarke nicht definiert.
<i>Soil Samples</i>	Fehler! Textmarke nicht definiert.
<i>Plant Samples</i>	Fehler! Textmarke nicht definiert.
<i>Soil Solution</i>	Fehler! Textmarke nicht definiert.
<i>15N Tracer Application</i>	Fehler! Textmarke nicht definiert.
<i>Microbiological Activity</i>	Fehler! Textmarke nicht definiert.
<i>Interviews</i>	Fehler! Textmarke nicht definiert.
<i>Statistical Analyses</i>	Fehler! Textmarke nicht definiert.
Most Important Research Findings	Fehler! Textmarke nicht definiert.
<i>Indigenous Knowledge about Terra Preta Formation</i>	Fehler! Textmarke nicht definiert.
<i>Economic Aspects of Production and Carbon Conversion Efficiencies</i>	Fehler! Textmarke nicht definiert.
<i>Charcoal Use in Agriculture</i>	Fehler! Textmarke nicht definiert.
<i>Charcoal and Smoke Extract (PA) Stimulate the Soil Microbial Community</i>	Fehler! Textmarke nicht definiert.
<i>Charcoal as Slow Release Nutrient Carrier</i>	Fehler! Textmarke nicht definiert.
<i>Perennial Plantations (Musa sp. and Paullinia cupana)</i>	Fehler! Textmarke nicht definiert.
Conclusions and Outlook	Fehler! Textmarke nicht definiert.
References	Fehler! Textmarke nicht definiert.
INDIGENOUS KNOWLEDGE ABOUT <i>TERRA PRETA</i> FORMATION	Fehler! Textmarke nicht definiert.
1.1 Abstract	Fehler! Textmarke nicht definiert.
1.2 Keywords	Fehler! Textmarke nicht definiert.
1.3 Introduction	Fehler! Textmarke nicht definiert.
1.4 Materials and Methods	Fehler! Textmarke nicht definiert.
1.4.1 <i>Study Site and Inhabitants</i>	Fehler! Textmarke nicht definiert.
1.4.3 <i>Interviews</i>	Fehler! Textmarke nicht definiert.
1.4.3 <i>Soil Sampling and Analyses</i>	Fehler! Textmarke nicht definiert.
1.4.4 <i>Microbiological Activity</i>	Fehler! Textmarke nicht definiert.
1.5 Results and Discussion	Fehler! Textmarke nicht definiert.
1.5.1 <i>Soil Fertility Management</i>	Fehler! Textmarke nicht definiert.
1.5.2 <i>Soil Fertility and Nutrient Contents</i>	Fehler! Textmarke nicht definiert.
1.5.3 <i>Microbiological Activity</i>	Fehler! Textmarke nicht definiert.
1.6 Acknowledgements	Fehler! Textmarke nicht definiert.
1.7 References	Fehler! Textmarke nicht definiert.
CHARCOAL MAKING IN THE BRAZILIAN AMAZON: ECONOMIC ASPECTS OF PRODUCTION AND CARBON CONVERSION EFFICIENCIES OF KILNS	Fehler! Textmarke nicht definiert.
2.1 Abstract	Fehler! Textmarke nicht definiert.
2.2 Keywords	Fehler! Textmarke nicht definiert.
2.3 Introduction	Fehler! Textmarke nicht definiert.
2.4 Materials and Methods	Fehler! Textmarke nicht definiert.
2.4.1 <i>Study Site</i>	Fehler! Textmarke nicht definiert.
2.4.2 <i>Surveys</i>	Fehler! Textmarke nicht definiert.
2.4.3 <i>Biomass Conversion Efficiency</i>	Fehler! Textmarke nicht definiert.
2.4.4 <i>Statistical Analyses</i>	Fehler! Textmarke nicht definiert.
2.5 Results and Discussion	Fehler! Textmarke nicht definiert.

2.5.1	<i>Production Process</i>	Fehler! Textmarke nicht definiert.
2.5.2	<i>Labour and Household Productivity</i>	Fehler! Textmarke nicht definiert.
2.5.3	<i>Charcoal Market and Waste</i>	Fehler! Textmarke nicht definiert.
2.5.4	<i>Conversion Efficiency, Carbon Balance and Agricultural Use</i>	Fehler! Textmarke nicht definiert.
2.6	Conclusion	Fehler! Textmarke nicht definiert.
2.7	Acknowledgements	Fehler! Textmarke nicht definiert.
2.8	References	Fehler! Textmarke nicht definiert.
SLASH AND CHAR—AN ALTERNATIVE TO SLASH AND BURN PRACTICED IN THE AMAZON BASIN		Fehler! Textmarke nicht definiert.
Textmarke nicht definiert.		
3.1	Abstract	Fehler! Textmarke nicht definiert.
3.2	Keywords	Fehler! Textmarke nicht definiert.
3.3	Introduction	Fehler! Textmarke nicht definiert.
3.4	Carbon Emissions in Slash and Burn Agriculture	Fehler! Textmarke nicht definiert.
3.5	Black Carbon in Soil – Terra Preta de Índio	Fehler! Textmarke nicht definiert.
3.6	Slash and Char an Alternative to Slash and Burn	Fehler! Textmarke nicht definiert.
3.7	Alternative Slash and Char in Practice	Fehler! Textmarke nicht definiert.
3.8	Advantages of Slash and Char	Fehler! Textmarke nicht definiert.
3.9	Slash and Char Research Activities	Fehler! Textmarke nicht definiert.
3.10	Conclusions	Fehler! Textmarke nicht definiert.
3.11	Acknowledgements	Fehler! Textmarke nicht definiert.
3.12	References	Fehler! Textmarke nicht definiert.
CHARCOAL AND SMOKE EXTRACT STIMULATE THE SOIL MICROBIAL COMMUNITY IN A HIGHLY WEATHERED XANTHIC FERRALSOL		Fehler! Textmarke nicht definiert.
4.1	Abstract	Fehler! Textmarke nicht definiert.
4.2	Keywords	Fehler! Textmarke nicht definiert.
4.3	Introduction	Fehler! Textmarke nicht definiert.
4.4	Material and Methods	Fehler! Textmarke nicht definiert.
4.4.1	<i>Statistical Analyses</i>	Fehler! Textmarke nicht definiert.
4.5	Results and Discussion	Fehler! Textmarke nicht definiert.
4.5.1	<i>Effects of Soil Charcoal Amendments</i>	Fehler! Textmarke nicht definiert.
4.5.2	<i>Effects of PA</i>	Fehler! Textmarke nicht definiert.
4.6	Acknowledgements	Fehler! Textmarke nicht definiert.
4.7	References	Fehler! Textmarke nicht definiert.
EFFECTS OF CHARCOAL AS SLOW RELEASE NUTRIENT CARRIER ON N-P-K DYNAMICS AND SOIL MICROBIAL POPULATION: POT EXPERIMENTS WITH FERRALSOL SUBSTRATE		Fehler! Textmarke nicht definiert.
5.1	Abstract	Fehler! Textmarke nicht definiert.
5.2	Keywords	Fehler! Textmarke nicht definiert.
5.3	Introduction	Fehler! Textmarke nicht definiert.
5.4	Material and Methods	Fehler! Textmarke nicht definiert.
5.4.1	<i>Microbial Population</i>	Fehler! Textmarke nicht definiert.
5.5	Results and Discussion	Fehler! Textmarke nicht definiert.
5.5.1	<i>Leaching of N, P and K</i>	Fehler! Textmarke nicht definiert.
5.5.2	<i>Soil NPK Contents</i>	Fehler! Textmarke nicht definiert.
5.5.3	<i>Plant Biomass Production and NPK Uptake</i>	Fehler! Textmarke nicht definiert.
5.5.4	<i>Microbial Populations</i>	Fehler! Textmarke nicht definiert.
5.6	Acknowledgments	Fehler! Textmarke nicht definiert.
5.7	References	Fehler! Textmarke nicht definiert.
LONG TERM EFFECTS OF MANURE, CHARCOAL AND MINERAL FERTILIZATION ON CROP PRODUCTION AND FERTILITY ON A HIGHLY WEATHERED CENTRAL AMAZONIAN UPLAND SOIL		Fehler! Textmarke nicht definiert.
6.1	Abstract	Fehler! Textmarke nicht definiert.
6.2	Keywords	Fehler! Textmarke nicht definiert.
6.3	Introduction	Fehler! Textmarke nicht definiert.
6.4	Materials and Methods	Fehler! Textmarke nicht definiert.
6.4.1	<i>Statistical Analyses</i>	Fehler! Textmarke nicht definiert.
6.5	Results and Discussion	Fehler! Textmarke nicht definiert.
6.5.1	<i>Biomass Production and Nutrient Contents of Plants and Grains</i>	Fehler! Textmarke nicht definiert.
6.5.2	<i>Soil Nutrient Contents</i>	Fehler! Textmarke nicht definiert.
6.5.3	<i>Soil Carbon Dynamics</i>	Fehler! Textmarke nicht definiert.
6.6	Conclusion	Fehler! Textmarke nicht definiert.
6.7	Acknowledgements	Fehler! Textmarke nicht definiert.
6.9	References	Fehler! Textmarke nicht definiert.

MICROBIAL RESPONSE TO CHARCOAL AMENDMENTS OF HIGHLY WEATHERED SOILS AND AMAZONIAN DARK EARTHS IN CENTRAL AMAZONIA		Fehler! Textmarke nicht definiert.
7.1	Abstract	Fehler! Textmarke nicht definiert.
7.2	Keywords.....	Fehler! Textmarke nicht definiert.
7.3	Introduction	Fehler! Textmarke nicht definiert.
7.4	Material and Methods.....	Fehler! Textmarke nicht definiert.
7.4.1	Study Design	Fehler! Textmarke nicht definiert.
7.4.2	Soil Sampling and Analyses:.....	Fehler! Textmarke nicht definiert.
7.4.3	Statistical Analyses:.....	Fehler! Textmarke nicht definiert.
7.5	Results and Discussion	Fehler! Textmarke nicht definiert.
7.5.1	Characteristics of ADE and Forest Soils:.....	Fehler! Textmarke nicht definiert.
7.6	Acknowledgements	Fehler! Textmarke nicht definiert.
7.7	References	Fehler! Textmarke nicht definiert.
NITROGEN RETENTION AND PLANT UPTAKE ON A HIGHLY WEATHERED CENTRAL AMAZONIAN FERRALSOL AMENDED WITH COMPOST AND CHARCOAL		Fehler! Textmarke nicht definiert.
8.1	Abstract	Fehler! Textmarke nicht definiert.
8.2	Keywords.....	Fehler! Textmarke nicht definiert.
8.3	Introduction	Fehler! Textmarke nicht definiert.
8.4	Materials and Methods.....	Fehler! Textmarke nicht definiert.
8.4.1	Study Location and Experimental Setup	Fehler! Textmarke nicht definiert.
8.4.2	Tracer Application, Sampling and Calculations.....	Fehler! Textmarke nicht definiert.
8.4.3	Statistical analyses.....	Fehler! Textmarke nicht definiert.
8.5	Results and Discussion	Fehler! Textmarke nicht definiert.
8.6	Acknowledgements	Fehler! Textmarke nicht definiert.
8.7	References	Fehler! Textmarke nicht definiert.
WEED COMPOSITION AND COVER AFTER THREE YEARS OF SOIL FERTILITY MANAGEMENT IN THE CENTRAL BRAZILIAN AMAZON: COMPOST, FERTILIZER, MANURE AND CHARCOAL APPLICATIONS		Fehler! Textmarke nicht definiert.
9.1	Abstract	Fehler! Textmarke nicht definiert.
9.2	Key words.....	Fehler! Textmarke nicht definiert.
9.3	Introduction	Fehler! Textmarke nicht definiert.
9.4	Materials and Methods.....	Fehler! Textmarke nicht definiert.
9.4.1	Experimental Site	Fehler! Textmarke nicht definiert.
9.4.2	Assessment of Weed Population.....	Fehler! Textmarke nicht definiert.
9.4.3	Data Analysis.....	Fehler! Textmarke nicht definiert.
9.5	Results and Discussion	Fehler! Textmarke nicht definiert.
9.5.1	Weed Species Composition	Fehler! Textmarke nicht definiert.
9.5.2	Weed Growth Response to Amendments	Fehler! Textmarke nicht definiert.
9.5.3	Weed species response to amendments.....	Fehler! Textmarke nicht definiert.
9.6	Acknowledgements	Fehler! Textmarke nicht definiert.
9.7	References	Fehler! Textmarke nicht definiert.
MICROBIAL POPULATION GROWTH POTENTIAL AS SOIL FERTILITY INDICATOR IN PERENNIAL CENTRAL AMAZONIAN PLANTATIONS TREATED WITH CHARCOAL, MINERAL- OR ORGANIC FERTILIZER..		Fehler! Textmarke nicht definiert.
10.1	Abstract	Fehler! Textmarke nicht definiert.
10.2	Keywords.....	Fehler! Textmarke nicht definiert.
10.3	Introduction	Fehler! Textmarke nicht definiert.
10.4	Materials and Methods.....	Fehler! Textmarke nicht definiert.
10.4.1	Banana Plantation	Fehler! Textmarke nicht definiert.
10.4.2	Guarana (<i>Paullinia cupana</i>) Plantation	Fehler! Textmarke nicht definiert.
10.4.3	Soil Sampling and Analyses	Fehler! Textmarke nicht definiert.
10.4.4	Statistical Analyses	Fehler! Textmarke nicht definiert.
10.5	Results and Discussion	Fehler! Textmarke nicht definiert.
10.5.1	Factor Charcoal	Fehler! Textmarke nicht definiert.
10.5.2	Factor Chicken Manure and Nitrogen.....	Fehler! Textmarke nicht definiert.
10.5.3	Factor Bone Meal and Phosphorus	Fehler! Textmarke nicht definiert.
10.5.4	The Influence of Charcoal on Organic and Inorganic Fertilization.....	Fehler! Textmarke nicht definiert.
10.6	Acknowledgements	Fehler! Textmarke nicht definiert.
10.7	References	Fehler! Textmarke nicht definiert.

EFFECTS OF CHARCOAL APPLICATION ON SOIL NUTRIENT CONTENTS, MINERAL NUTRITION OF BANANA (*Musa sp.*) AND FRUIT PRODUCTION – AN ON-FARM STUDY IN THE CENTRAL AMAZON, BRAZILFehler! Textmarke nicht definiert.

11.1	Abstract	Fehler! Textmarke nicht definiert.
11.2	Keywords	Fehler! Textmarke nicht definiert.
11.3	Introduction	Fehler! Textmarke nicht definiert.
11.4	Methods	Fehler! Textmarke nicht definiert.
11.4.1	<i>Bulk Density and Soil Water Retention Curve (SWRC)</i>	Fehler! Textmarke nicht definiert.
11.4.2	<i>Statistical Analyzes</i>	Fehler! Textmarke nicht definiert.
11.5	Results and Discussion	Fehler! Textmarke nicht definiert.
11.5.1	<i>Foliar Nutrient Contents</i>	Fehler! Textmarke nicht definiert.
11.5.2	<i>Soil Nutrients</i>	Fehler! Textmarke nicht definiert.
11.5.3	<i>Soil Solution</i>	Fehler! Textmarke nicht definiert.
11.5.4	<i>Soil Physics</i>	Fehler! Textmarke nicht definiert.
11.5.5	<i>Harvest</i>	Fehler! Textmarke nicht definiert.
11.6	Acknowledgements	Fehler! Textmarke nicht definiert.
11.7	References	Fehler! Textmarke nicht definiert.
APPENDIXES		Fehler! Textmarke nicht definiert.
Appendix I: Curriculum Vitae.....		Fehler! Textmarke nicht definiert.
Appendix II: Publications and Conference Participations.....		Fehler! Textmarke nicht definiert.
	First author	Fehler! Textmarke nicht definiert.
	Coauthor	Fehler! Textmarke nicht definiert.
	Conference abstracts	Fehler! Textmarke nicht definiert.
	Conference participation	Fehler! Textmarke nicht definiert.
	Books	Fehler! Textmarke nicht definiert.
	Radio – interviews	Fehler! Textmarke nicht definiert.
	Television	Fehler! Textmarke nicht definiert.
Appendix III: Erklärung		Fehler! Textmarke nicht definiert.
Appendix IV: Nature and Science Article.....		Fehler! Textmarke nicht definiert.
Appendix V: Chapter VI Data Tables		Fehler! Textmarke nicht definiert.
Appendix VI: Chapter IX Plant Species Table.....		Fehler! Textmarke nicht definiert.

ZUSAMMENFASSUNG

Einleitung

Die tropischen Wälder enthalten zwischen 20 und 25% des terrestrischen Kohlenstoffes (C). Die Böden beinhalten in etwa die gleiche Menge C als die Vegetation darüber. Die gegenwärtige Konvertierung von Wald in landwirtschaftlich genutzte Flächen reduziert diesen Kohlenstoffspeicher beträchtlich und emittiert eine erhebliche Menge an Treibhausgasen. Veränderungen in der Landnutzung, besonders Entwaldung, reduzieren die organische Substanz (OS) in den oberen Bodenhorizonten um 20 bis 50%. Diese Reduktion von C im Boden vermindert die Bodenfruchtbarkeit erheblich. Bedingt durch das tropische Klima wird in landwirtschaftlich genutzten Böden über die Hälfte der Nährstoffe in zwei Jahren mineralisiert. Daher kann ohne zusätzliche Düngung keine Bewirtschaftung des Bodens für mehr als drei Jahre aufrechterhalten werden.

Zudem wird die Effektivität herkömmlicher Düngung durch die geringe Nährstoffspeicherkapazität reduziert. Tropische Niederschläge waschen leicht verfügbare und mobile Nährstoffe (z. B. Stickstoff, N) rasch in tiefe Bodenhorizonte aus, wo sie für die meisten Kulturpflanzen nicht verfügbar sind.

Deshalb betreiben weltweit etwa 300 bis 500 Millionen Menschen, auf einem Drittel der 1500 Millionen ha landwirtschaftlich genutzten Landoberfläche, Wanderfeldbau mit Brandrodung. Dieses traditionelle Bewirtschaftungssystem ist nachhaltig, wenn ausreichende Brachezeiten (bis 20 Jahre) kurzen Anbauzeiten folgen. Bevölkerungswachstum und geänderte Lebensgewohnheiten beeinträchtigen die Nachhaltigkeit von Wanderfeldbau. In den meisten landwirtschaftlichen Systemen war eine Verkürzung der Brachezeiten die Konsequenz steigender Bevölkerungsdichte.

Mit C angereicherte Böden (hauptsächlich Ferralsole) in Amazonien (Indianer Schwarzerdeböden oder *Terra Preta de Índio*) beweisen, dass diese landwirtschaftlich kaum nutzbaren Böden in nachhaltig fruchtbare Böden umgewandelt werden können. Menschliche Anreicherungen von Phosphor (P) und Kalzium (Ca), in Form von Knochen und C in Form von Holzkohle schufen diese außerordentlich fruchtbare *Terra Preta*. Holzkohle verbleibt über Jahrhunderte im Boden und ist verantwortlich für die Stabilität der OS in *Terra Preta*. Diese Böden wurden vermutlich seit jeher intensiv kultiviert.

Die Bewahrung von OS in tropischen Böden könnte einer Abnahme der Bodenfruchtbarkeit entgegen wirken und so den Druck auf bestehende Primärwälder reduzieren. Holzkohle scheint ein geeignetes Medium zu sein, um leicht abbaubare Biomasse in sehr stabile OS im Boden zu überführen. Brandrodung scheint dies nicht zu bewerkstelligen, weil nach einem Feuer nur 1,7% des Kohlenstoffes in der ursprünglichen Biomasse in Form von Holzkohle erhalten bleibt.

Zielsetzungen und Arbeitsumfang

Die Verwendung der oberflächlichen Biomasse (Sekundärwald oder Ernterückstände) zur Holzkohleproduktion für Bodenverbesserungsmaßnahmen (engl. *slash and char* genannt) anstatt der üblichen Umwandlung in Kohlendioxid (CO₂) durch Verbrennung (Brandrodung, engl. *slash and burn*) würde eine bedeutende Kohlenstoffsénke bilden, die OS im Boden erhöhen und bewahren und damit die Nachhaltigkeit der Bodenbewirtschaftung verbessern.

Ziel dieser Dissertation war es daher, den Nutzen von Holzkohle in der Landwirtschaft und deren Einfluss auf die Bodenfruchtbarkeit eines stark verwitterten Xanthic Ferralsols auf *Terra Firme* im Norden von Manaus (Brasilien) zu untersuchen. Die Dissertation beinhaltet Feld- (Kapitel VI, VII, VIII, IX, X, und XI), Gewächshaus- (Kapitel V) und Labor-

experimente (Kapitel IV). Zusätzlich wurden Daten an lokalen Holzkohleproduktionsstätten gesammelt (Kapitel II und III) und das Bodenmanagement einer indigenen Gruppe (Kapitel I) beobachtet und beschrieben.

Das erste Kapitel beschreibt die Beeinflussung der Bodenfruchtbarkeit mit Hilfe von Feuer und organischem Material. Kapitel II stellt sowohl die ökonomischen Rahmenbedingungen als auch Produktionstechniken und Produktionseffizienz (C Bilanz) der Holzkohleerzeugung dar. Die Realisierbarkeit von *slash and char* und das Potential für Kohlenstoffsequestrierung mit oder ohne Kohlenstoffhandel werden diskutiert. Beobachtungen über gegenwärtige Holzkohleverwendung in der Landwirtschaft sind im Kapitel III zusammengefasst.

Der Einfluss von Holzkohle und Holzzessig (lat. *Acetum lignorum* oder auch *Acidum pyrolignosum*) auf die Bodenatmung, und exponentielles Populationswachstum der Mikroben wird im Kapitel IV beschrieben. Die Effektivität von Holzkohle im Vergleich zu Kaolin als Trägermedium für Mineraldünger (N, P und K) wurde in einem Gewächshaus getestet. Reiskeimlinge wurden entweder mit NPK-angereicherter Holzkohle oder Kaolin gedüngt, die Verfügbarkeit für Pflanzen und Mikroorganismen bestimmt und die Verluste durch Auswaschung gemessen (Kapitel V).

Die Langzeitwirkung von organischer und anorganischer Düngung auf die Bodenfruchtbarkeit und den Ertrag wurde im Kapitel VI bewertet. Dazu wurden 15 verschiedene Bodenzusätze in unterschiedlichen Kombinationen und fünf Wiederholungen während vier Anbauzyklen von Reis (*Oryza sativa* L.) und Hirse (*Sorghum bicolor* L.) im Feldversuch getestet. Die Dosierung von Hühnermist, Kompost, Holzkohle und Laubstreu wurde auf gleichen Kohlenstoffgehalt bezogen. Im Kapitel VII wird der Einfluss auf die Mikrobentätigkeit durch Messung der Bodenatmung beschrieben. Das mikrobiologische Reproduktionspotential nach Substratzugabe (substratinduzierte Respiration, SIR) diente als Indikator für die Bodenfruchtbarkeit und wurde mit *Terra Preta* verglichen. Eine Düngung mit ¹⁵N markiertem Stickstoffdünger gab Aufschluss über das Stickstoffspeichervermögen der Böden mit Holzkohle oder Kompost angereichert wurden, im Vergleich zu Parzellen die nur mineralisch gedüngt wurden (Kapitel VIII). Die nachfolgende Besiedelung durch Unkräuter und deren Artenzusammensetzung wird im Kapitel IX beschrieben.

Im Kapitel X wird organische Düngung und anorganische Düngung in zwei mehrjährigen Kulturen (*Musa sp.*, *Paullinia cupana*) untersucht. Dabei wurden die Verfügbarkeit von Nährstoffen und die Bodenatmung verglichen. Der Einfluss von Holzkohle, N und P wurde mittels Faktorenanalyse bestimmt. Jede Pflanzung beinhaltete 27 (3³) verschiedene Bodenbehandlungstypen und testete drei verschiedene Faktoren (Holzkohle, N und P) in 3 unterschiedlichen Dosierungen. Während die Bananenpflanzung (*Musa sp.*) zusätzlich zur Holzkohle mineralisch gedüngt wurde, bekam die Guaranapflanzung (*Paullinia cupana*) Hühnermist und Knochenmehl als entsprechende Faktoren. Kapitel XI behandelt Blattspiegelwerte, verfügbare Nährstoffe im Boden, Nährstoffauswaschung, Bodendichte und Wasserspeichervermögen in Böden mit Holzkohlezugabe (Pulver, kleine Stücke und normaler Abfall von der Holzkohleerzeugung) im Vergleich zur normalen landwirtschaftlichen Praxis. Um die Praxistauglichkeit von Holzkohleapplikationen zu testen, wurde das Experiment in einer expandierenden Bananenplantage etabliert.

Die wichtigsten Forschungsergebnisse

Die Bodenverbesserung der besuchten indigenen Bevölkerung basiert auf Feuer und organischem Material. Als erster Schritt wird gebrannter Boden (*Terra Queimada*) mittels Feuer erzeugt. Nach dem Brennen hat der Boden einen starken Geruch von Holzzessig (*Terra Cheirosa*), welcher die Mikrobentätigkeit anregt (Kapitel I und IV). Dies reicht für anspruchslose Kulturen (z. B. Maniok). Für spezielle Kulturen (Heilpflanzen und Gemüse) zwischen

den Behausungen wird der Boden mit verbrannten organischen Materialien (Asche und verkohle Rückstände) vermengt (Abbildung 1-1). Obwohl die meisten Bodennährstoffgehalte der neu erzeugten *Terra Preta* unter den Durchschnittswerten der *Terra Preta* liegen, befindet sich der Großteil innerhalb der Spannbreite (Tabelle 1-3). Der Gehalt an P und Schwefel (S) ist jenen der *Terra Mulata* (TM) ähnlich. Die dunkelbraune TM wird häufig in der Umgebung von *Terra Preta* gefunden und hat ebenso hohe Werte an OS wie diese. TM findet man auf vorkolumbischen Landwirtschaftsflächen, welche die ehemaligen Siedlunguen umgeben. Diese Art der Bodenfruchtbarkeitserhöhung erzeugt Holzkohle und färbt den Boden schwarz.

Zwei verschiedene Typen von Holzkohleproduzenten konnten unterschieden werden (Kapitel II). Für die erste Gruppe ist die Produktion von Holzkohle die einzige Einkunftsquelle, weil deren landwirtschaftliche Aktivitäten nicht gewinnbringend sind (solely charcoal makers SC). Die zweite Gruppe ergänzt ihr Einkommen (Beschäftigung in der Stadt) mit der Produktion von Holzkohle (additionally charcoal makers AC). AC verdienen das Siebenfache an der Holzkohleproduktion als SC, weil sie über einen Zugang zu den Märkten in der Stadt verfügen (Transport). Die meisten Befragten (77%) begründeten ihre Köhleraktivitäten mit dem Unvermögen landwirtschaftlich zu produzieren. Nur AC verfügen über genügend Kapital, um in die Bodenfruchtbarkeit zu investieren und würden daher eher von einer Verwendung der Holzkohleproduktionsabfälle (Staub und kleine Stücke) profitieren. Wäre ein globaler Markt für diesen Kohlenstoff als CO₂-Senke vorhanden, dann würde dieser den meisten Nutzen für SC bringen. Die durchschnittliche Umwandlungseffizienz von C im Holz zu C in Holzkohle war 42% in den Ziegelmeilern, und die Holzkohlegewinnung als Prozentsatz des Holzgewichts war 25.3% (Tabelle 2-2). Wenn lediglich die Produktionsabfälle am Produktionsort für Bodenverbesserung genutzt werden, würden 3.7% (nur 1.7% verbleibt nach einer typischen Brandrodung) des ursprünglichen C im Holz in stabile OS überführt. Ein weiterer großer Prozentsatz an Holzkohleabfällen entsteht während des Transports, der Portionierung und des Verkaufs. Gewöhnlich werden diese Abfälle für landwirtschaftliche Zwecke (Kapitel II und III) am Holzkohlemarkt in der Stadt abgeholt. Wegen der geringen Produktionskosten unter den Bedingungen des Wanderfeldbaus (~ 48 USD pro Tonne Holzkohle; 1 Tonne Holzkohle ~ 3 Tonnen CO₂), könnten bei einer Anerkennung von landwirtschaftlicher Holzkohle als Kohlenstoffsene, Profite aus dem C-Emissionshandel gemacht werden (.). Diese würden die Verwendung in der Landwirtschaft begünstigen.

Die Verwendung von Holzkohle zur Bodenverbesserung konnte an verschiedenen Orten in der Umgebung von Manaus beobachtet werden. Holzkohleabfall wird in sehr vielfältiger Weise verwendet. Die Bandbreite reicht vom Zusatzstoff für Hühnerfutter, direkter Applikation bis zur Produktion von Holzkohlekompost. Obwohl die Holzkohleproduktion als alternative Entwaldungsmethode (zum Brennen) praktiziert wird, werden die Holzkohleabfälle (Staub und kleine Stücke) nicht immer für landwirtschaftliche Zwecke eingesetzt (Kapitel III).

Unverwitterte Holzkohle steigert die Bodenatmung, Mikrogenbiomasse, Populationswachstum und die Effizienz der Mikroben signifikant mit zunehmender Holzkohleapplikation (50, 100 und 150 g kg⁻¹ Boden, Abbildung 4-2). Die Applikation von Holzessig (12,5 ml kg⁻¹ Boden) verursachte einen steilen Anstieg der Bodenatmung, Mikrogenbiomasse und der Reproduktionsrate (Kapitel IV, Abbildung 4-3). Daraus folgere ich, dass der kondensierte Rauch (Holzessig) leicht abbaubare Verbindungen enthält und nur wenige hemmende Stoffe, welche von den Mikroben für den Stoffwechsel genutzt werden.

Wenn Ammoniumsulfat [(NH₄)₂SO₄] mit Holzkohle als Nährstoffträger gedüngt wurde konnten die N-Verluste durch Auswaschung im Treibhausversuch signifikant vermindert werden, (Kapitel V, Abbildung 5-1). Bedingt durch den K-Gehalt der Holzkohle war die Auswaschung von K signifikant erhöht, wenn Kaliumchlorid gemeinsam mit Holzkohle gedüngt wurde. Am Ende des Experiments waren sowohl die N als auch die K-Werte in

den Töpfen mit Holzkohle signifikant höher. Die Holzkohle diente als K-Dünger und steigerte gleichzeitig das Rückhaltevermögen für N. Die P-Werte wurden nur von der Düngedosis beeinflusst, nicht vom Nährstoffträger. Das Verhältnis der Bodenatmung zur Mikrobiomasse ($\text{CO}_2\text{-C h}^{-1} \text{ C mic}^{-1}$) war in Böden mit Holzkohle kleiner.

Organische Düngung konnte im Feldexperiment die Bodenfruchtbarkeit dauerhaft steigern und ein synergetischer Effekt von gemeinsamer Applikation von Holzkohle und Mineraldünger (NPK) wurde beobachtet (Kapitel VI, VII, VIII und IX). Hühnermistzugabe resultierte in der größten ($P < 0,05$) Gesamternte (12.4 Mg ha^{-1}) von vier aufeinander folgenden Anbauzyklen. Eine signifikante Steigerung des pH Wertes und der P, Ca und Magnesium (Mg)-Gehalte im Boden waren dafür verantwortlich (Abbildung 6-3). Eine einmalige Kompostapplikation vervierfachte den Ernteertrag ($P < 0,05$) im Vergleich zu Feldern, die zweimal mineralisch gedüngt wurden. Holzkohle im Boden konnte das Pflanzenwachstum deutlich steigern und verdoppelte den Ernteertrag, wenn zusätzlich mineralisch gedüngt wurde im Vergleich zu mineralisch gedüngten Flächen ohne Holzkohle ($P < 0,05$; Abbildung 6-1). Bedingt durch die höheren Ernten wurden auf den Feldern mit Holzkohle und mineralischer Düngung mehr Nährstoffe exportiert, die verfügbaren Nährstoffe im Boden haben jedoch nicht im gleichen Ausmaß abgenommen wie auf den Feldern, die nur mineralisch gedüngt wurden. Der Gehalt an austauschbarem Aluminium (Al) wurde mit Holzkohle signifikant reduziert. In Feldern mit Holzkohle war die OS wesentlich beständiger (8% bzw. 4% Kohlenstoffverlust, wenn gedüngt, bzw. nicht gedüngt) als in Feldern mit Hühnermist (27%), Kompost (27%), und sogar in unbehandelten Kontrollböden (25% Verlust).

Das Reproduktionspotential der Bodenmikroben korrelierte mit der Verfügbarkeit von Nährstoffen und den Ernteerträgen (Kapitel VII). Mineralisch gedüngte holzkohlehaltige Böden und *Terra Preta* zeigten eine signifikant erhöhte Reproduktionsrate nach Substratzugabe (Glukose). Die Bodenatmung war jedoch sehr niedrig in Abwesenheit einer leicht abbaubaren Kohlenstoffverbindung (Glukose). Auf den Versuchsfeldern korrelierte die Bodenatmung positiv mit der Reproduktionsrate. *Terra Preta* hingegen, zeigte eine sehr geringe Bodenatmung, aber sehr schnelles exponentielles Reproduktionsvermögen der Mikroben nach Substratzugabe. Waldböden hatten höhere Respirationsraten, aber zeigten kein Populationswachstum (Abbildung 7-6). Dieser Unterschied ist auf die Verfügbarkeit von abbaubarer OS in Waldböden mit schlechter Nährstoffverfügbarkeit im Gegensatz zu der stabilen OS in *Terra Preta* mit hoher Nährstoffverfügbarkeit zurückzuführen. Eine schwer abbaubare Kohlenstoffquelle (Holzkohle) zusammen mit einer mineralischen Nährstoffquelle könnte eine hungernde Mikrobenpopulation mit schnellem Wachstumspotential bei Verfügbarkeit einer leicht abbaubaren Kohlenstoffquelle erhalten.

Die größere Biomasseproduktion auf Feldern mit Kompost führte zu einer signifikant höheren Aufnahme von ^{15}N -markiertem Stickstoffdünger (Kapitel VIII). Bedingt durch eine höhere Retention im Boden und Rückführung aus Ernterückständen, war nach der zweiten Ernte die Wiederfindung von ^{15}N im Boden signifikant höher auf Flächen mit Holzkohle. Nach zwei Ernten war die Gesamtwiederfindung (im Boden, Ernterückstände und Körner) auf Feldern mit Kompost (16,5%), Holzkohle (18,1%) und Holzkohle plus Kompost (17,4%) signifikant höher als auf Feldern, die nur mineralisch gedüngt (10,9%) wurden (Abbildung 8-1).

Nach Beendigung des Nutzpflanzenanbaues wurde auf gedüngten Feldern (Mineraldünger, Kompost oder Hühnermist) um 40, 22 und 53% erhöhte Unkrautdichte festgestellt (Kapitel IX). Der Artenreichtum auf diesen Flächen war um 20, 48 und 63% erhöht. Die Dominanz einiger weniger Arten war reduziert auf Feldern mit Hühnermist, d. h. ein gleichmäßigeres Auftreten der verschiedenen Arten wurde beobachtet. Holzkohleapplikation alleine konnte die Unkrautnachfolge nicht signifikant beeinflussen, die Kombination von Holzkohle

mit Mineraldünger führte hingegen zu einem synergetischen Effekt. Die Bodenbedeckung durch Unkräuter war 45% auf anorganisch gedüngten Flächen, 2% auf Flächen mit Holzkohle und 66% auf Flächen, die beide Zugaben bekommen haben. Diese Unterschiede wurden beinahe 2,5 Jahre nach der Einarbeitung von Holzkohle, Hühnermist und Kompost und mehr als 1 Jahr nach der letzten Mineraldüngung beobachtet.

Ein Vergleich von anorganischer mit organischer Düngung in mehrjährigen Kulturen (Bananen und Guarana) bestätigte die Bedeutung von Holzkohle speziell in anorganisch gedüngten Landwirtschaftssystemen (Kapitel X). Nur in der anorganisch gedüngten Versuchsfläche wurde durch Holzkohleapplikation der pH-Wert, Gesamt-N, die Verfügbarkeit von Natrium (Na), Zink (Zn), Mangan (Mn), Kupfer (Cu) und die Bodenfeuchtigkeit erhöht und verfügbares Al und Azidität reduziert. Dies führte zu einer signifikanten Zunahme der Bodenatmung und Effektivität der Mikroorganismen, gemessen an der CO₂ Freisetzung pro Mikroorganismus im Boden (Abbildungen 10-1 und 10-2). Weil organische Düngung die Nährstoffkonzentrationen und deren Verfügbarkeit steigerten, wurde auch die Mikrobiomasse, deren Effektivität und Populationswachstumsrate signifikant erhöht. Mit Ausnahme von Eisen (Fe) und Al, dessen Verfügbarkeit vermindert wurde ($P < 0.05$), konnten insbesondere mit Hühnermistdüngung alle gemessenen Parameter erhöht werden. Mit Knochenmehldüngung wurde der Mg und N Gehalt im Boden gesteigert und verfügbares Al gesenkt.

Holzkohleapplikationen verminderten die Azidität in den Pflanzlöchern einer kommerziellen Bananenplantage (Kapitel XI, Abbildung 11-2). Ferner erhöhte Holzkohle den K-Gehalt des Bodens (0,2 – 0.4 m Bodentiefe) und die Blattspiegelwerte von Ca, Mg und S signifikant. Eine Steigerung der Bananenproduktion konnte nicht gemessen werden. Nur die erste Bananernte konnte erfasst werden, welche als weniger aussagekräftig gilt.

Schlussfolgerungen

Die Produktion von Holzkohle ist in Amazonien weit verbreitet. Holzkohleproduktionsabfälle sind reichlich vorhanden und finden auch in der Landwirtschaft Verwendung. Wegen der geringen Bodenfruchtbarkeit und weil Düngemittel für die meisten Bauern unerschwinglich sind, scheitern trotzdem viele Siedler an der landwirtschaftlichen Produktion.

Holzkohle beeinflusste die Bodenqualität vielfältig, wobei die Reduktion der Azidität und dem verfügbaren Al am wichtigsten ist. Zudem steigerte Holzkohle die Effizienz von mineralischem N Dünger und erhöhte die K Versorgung von Nutzpflanzen. Holzkohle steigerte das Reproduktionspotential von Mikroben nach Zugabe von Glukose, unabhängig ob mineralisch gedüngt wurde oder nicht. Das wurde auch auf *Terra Preta* beobachtet, obwohl die Bodenatmung nicht höher als die der Kontrollflächen war. Nachdem der leicht abbaubare Anteil der Holzkohle veratmet wurde, bleibt der stabile Anteil zurück, welcher ein bevorzugtes Habitat für Mikroben bietet. Der Einfluss von Holzkohle auf biologische, chemische und physikalische Bodeneigenschaften ist komplex, was die Isolation einzelner signifikanter Effekte erschwert, aber summiert verursachten diese die signifikant gesteigerten Ernteerträge.

Mehr Information über die agronomischen Möglichkeiten von Holzkohle, das Potential verschiedener Biomassequellen und die Produktion von Nebenprodukten sind notwendig, um die Chancen einer Etablierung von *Slash and Char* abzuschätzen. Der Zugang zum globalen Kohlenstoffhandel würde die alternative Verwendung von Holzkohle erleichtern und einen starken Anreiz bieten, auf weitere Entwaldung zu verzichten (nur die Nutzung erneuerbarer Biomasse kann eine Kohlenstoffsénke etablieren). Beides würde einen bedeutenden Beitrag zur Reduktion des Klimawandels leisten.