

FACULTY OF AGRICULTURAL SCIENCES

Institute of Agricultural Sciences in the Tropics (Hans-Ruthenberg Institute) (490)

University of Hohenheim

Agronomy in the Tropics and Subtropics (490e)

Prof. Dr. Frank Rasche (Supervisor)



UNIVERSITY OF HOHENHEIM

Fertility and microbial functioning of soils of smallholder farming systems under contrasting tropical agro-ecologies

Dissertation

Submitted in fulfillment of the requirements for the degree

“Doktor der Agrarwissenschaften”

(Dr.sc.agr./ Ph.D. in Agricultural Sciences)

to the

Faculty of Agricultural Sciences

Presented by

Isaac Balume Kayani

born in Ishasha District, Democratic Republic of Congo

Stuttgart-Hohenheim, 2021

5.6 Limitations of the study

During soil fertility assessment this PhD study did not assess the amount of fertilizer inputs (organic and inorganic) allocated per ha. That additional information would have reinforced our findings related to diminishing of soil fertility with increasing market distance. It was assumed that farmers' fields near market centers benefited from market participation to easily selling agricultural produce, therefore continue investing in soil fertility management than farmers' fields in the remote. Previously, gradients of fertility have been revealed with increasing distance from the homestead as result of differences in resource allocation in farmer field (Tittonell et al., 2005b). The reason was that home garden fields have accumulated nutrients from compost and animal feeds over time than remote fields. In addition, collecting information on labor allocation would have been essential to reinforce our argumentation explaining soil fertility differences between resource endowment classes. The assumption would be that wealthy resource endowment may have benefited from intensive labor than the poor resource endowment farmers, factor that could result in severe labor shortage on farms of poor resource endowment, therefore, negatively impacting soil fertility of their lands.

This PhD study did not assess mass loss of the *C. calothyrsus* residue. This information could have provided the rate of decomposition allowing to reinforce assumptions on biochemical attributes. Previous studies have used such set-up to assesses organic matter breakdown, important functional process in the changes of soil organic resource applied to the soil over time (Knacker et al., 2003). In addition to mass loss, soil texture as an important physical property was missing. This could have reinforced argumentation on differences in initial fertility status between the two soil classes (soil pH 5.1 versus 4.3). The study of Muema et al (2016) revealed modulation of microbial community structure by soil texture. Finally, the lack of a higher range in biochemical quality [(high quality (L+PP)/N = 8) versus (low quality (L+PP)/N = 5)] used for this study may have been a short coming. It was deduced that selection of residue quality of more contrasting biochemical quality could react differently leading to stronger effect on nitrifying community.

5.7 Recommendation for future studies

I recommend to conduct more studies on site specific contribution to fertility in order to evaluate the effects of biophysical, socio-economic on farming systems to fit formulation of management strategies to local adaption. Careful assessment of landscape needs to be considered as this is composed with different geological material influencing the nature of soils. Future studies should explore other biophysical and socio-economic factors that could contribute to fertility variability. There is a need to enlarge the typological indicators to off-farm household income due to the fact that extra-farm activities generate cash that may also be allocated to farm management.

For further understanding of ecological functioning of soil microbes, I recommend for future studies to combine phospholipid fatty acids (PLFA) and DNA-based stable isotope probing. These

techniques will contribute in determining specific microbial species active in performing specific processes in the soil. Regarding organic input management, there is a need of including seasonal leguminous of high quality i.e. with easily decomposable attributes in order to increase N supply at earlier stages of decomposition so that seasonal crops can utilize that at reproductive stages. Future decomposition studies need to consider temperature sensitivity to adapt the proposed organic residue management practices to fit dynamic of the C pools stored in SOM, key question in climate change research and fertility rehabilitation of tropical soils. Knowing that the increase in temperature of 1°C could lead to a loss of about 10% of soil organic C, affecting both microbial community structure and functions (Wei et al., 2014). Careful examination of the interaction between soil type and residue quality would be especially useful for improving the efficacy of organic inputs in managing soil fertility. More research is needed to better understand the role of microbial functions in proposed soil management strategies. Finally, future studies should consider age of organic residue inputs, as lignin and polyphenol concentrations accumulate over time in plant cells. Finally, there is a need of extending this PhD study to field-based experiment in order to capture various environmental factors that occur on farmers' fields.

5.8. Summary

Soil fertility in tropical agroecosystems is often subjected to degradation that leads to nutrient depletion with negative effects on land productivity and food security. This challenge is aggravated by the complexity of socio-economic (market distance, farm typology) and biophysical (agroecology, site) conditions causing soil fertility variability. Consequently, blanket fertilizer recommendations cannot be applied in areas of high fertility variability. In this PhD study, methods were harmonized to assess drivers of soil fertility status across regions. Despite being pointed as

factors contributing to soil fertility variability, market access, farm typology (resource endowment) and agro-ecology have not been subjected to soil fertility assessment. This PhD study aimed mainly at verifying that these factors have to be integrated rather than considered in isolation to enable accurate assessments of soil fertility across spatial scales and socio-economic gradients.

It was hypothesized that market distance and farm typology is a determinant of agricultural development in Democratic Republic of Congo (DRC). As market distance is increasing, the soil fertility status of smallholder farming systems decreases despite farmers' wealth. In a parallel study conducted in Ethiopia, it was complementarily hypothesized that the soil fertility status is also influenced by inter-related effects of agro-ecology and farm typology. As nitrogen (N) is known to be limiting in smallholder farms, conservation and sustainable provision of this nutrient will be essential to achieve niche-based integrated soil fertility management (ISFM) strategies. Therefore, understanding of the ecological processes (proteolysis, nitrification) that control soil N availability through organic residue management in varying soil fertility variability conditions will be essential. Low concentrations of lignin (L) and polyphenols (PP) relative to N have been acknowledged to facilitate decomposition, hence, stimulate the abundance of proteolytic and nitrifying soil microbial communities. Therefore, it was hypothesized that high quality (low $(L+PP)/N$) residue applied to high pH soils have a positive relationship between the functional potential of proteolytic enzymatic activities and abundance of nitrifying communities.

The survey studies in DRC and Ethiopia were guided by the following objectives; 1) To determine the inter-related influence of market distance and farm typology on soil fertility status of smallholder farming systems of South-Kivu, Eastern DRC. 2) To assess the inter-related effects of agro-ecology and farm typology on soil fertility status across crop-livestock systems in Western

and Central Ethiopia. Moreover, to better understand the ecological processes (proteolysis, nitrification) that control N through organic residue management in varying soil fertility variability conditions, an incubation study was performed to meet objective 3) To verify that potential proteolytic enzyme activities modulate archaeal and bacterial nitrifier abundance in soils with differing acidity and organic residue treatment.

Results from the soil survey study in DRC revealed a decreasing soil fertility with increasing market distance across all farm typologies. A significant influence of farm typology was found for exchangeable calcium and magnesium, while factor site resulted in a significant difference of plant available phosphorus. Furthermore, factor “site” interacted with market distance for soil organic carbon (SOC) quality indexes. In addition, the interaction of market distance and typology became obvious in the medium wealthy and poor farms. Market distance effects were associated with walking distance, while site effects were attributed to factors such as soil type and climatic conditions. In Ethiopia, inter-related effect of agro-ecology and farm typology was found. Higher total carbon and total nitrogen was found in wealthy farmers’ field compared to poor farmers’ field in the highlands. As an indication of soil quality, lowest SOC stability indexes were revealed in soils of wealthy compared to that from poor farm typology. These differences in soil fertility were attributed to farm management practices among typology classes and agro-ecological zone distinctions.

The result from the incubation study revealed a significant relationship of proteolytic enzyme activities with the abundance of ammonia oxidizing bacteria and archaea, even though the extent of this relationship was more dependent on soil pH and incubation time, but not residue quality. This suggests that the effect of soil pH is stronger than that of residue quality on enzyme activity and nitrifiers community, reflecting the importance of soil physico-chemical conditions rather than

management practices. The incubation study further showed that nitrifying prokaryotes benefitted from the release of N spurred by proteolysis, and indicated a niche specialization between ammonia oxidizing bacteria and archaea depending on soil acidity and resource availability.

Overall, this PhD study showed that market access, typology and agro-ecology were important drivers of soil fertility variability in the study regions of DRC and Ethiopia. However, factor site played a significant role in shaping soil fertility variability, implying that site-specific recommendations could be a way forward for designing soil fertility management in smallholder farmers. It was inferred that prospective niche-based ISFM strategies must consider such contrasting but interrelated factors including, but not limited to agro-ecology, farm typology and market access. This would reduce the effect of soil fertility variability across regions.

This PhD study only considered land size (DRC, Ethiopia), livestock and mineral fertilizers (Ethiopia) as key features to define the wealth status of targeted farms; future studies should consider a wider range of socio-economic and biophysical factors including labor availability, off-farm household income and soil management history for more accuracy of soil fertility variability. This will strengthen the accuracy of prospective soil fertility assessments across socio-economic gradients and spatial scales. Finally, it is suggested to extend the results from the incubation study to field conditions considering soils with a broader soil acidity range and organic residues with more distinct biochemical quality. This will verify the given assumptions about the functional relationships between proteolytic and nitrifying soil communities. Overall, the presented PhD study has contributed to ongoing research on best-fit soil fertility recommendations and knowledge gaps about soil ecological functioning, by providing an advanced understanding of driving factors of soil fertility variability and soil microbial functioning in smallholder farms in tropical environments.

Zusammenfassung

Die Bodenfruchtbarkeit in tropischen Agrarökosystemen ist häufig einer Degradation unterworfen, die zu einer Verarmung der Nährstoffe führt, was sich negativ auf die Produktivität des Bodens und die Ernährungssicherheit auswirkt. Diese Herausforderung wird durch die Komplexität der sozioökonomischen (Marktentfernung, Betriebstypologie) und biophysikalischen (Agrarökologie, Standort) Bedingungen, die eine Variabilität der Bodenfruchtbarkeit verursachen, noch verschärft. Folglich können pauschale Düngeempfehlungen in Gebieten mit hoher Fruchtbarkeitsvariabilität nicht angewendet werden. In dieser Studie wurden die Methoden harmonisiert, um die Einflussfaktoren auf den Bodenfruchtbarkeitsstatus in verschiedenen Regionen zu bewerten. Obwohl sie als Faktoren genannt wurden, die zur Variabilität der Bodenfruchtbarkeit beitragen, wurden der Marktzugang, die Betriebstypologie (Ressourcenausstattung) und die Agrarökologie noch nicht einer Bewertung der Bodenfruchtbarkeit unterzogen. Diese Studie zielte hauptsächlich darauf ab, zu verifizieren, dass diese Faktoren integriert und nicht isoliert betrachtet werden müssen, um genaue Bewertungen der Bodenfruchtbarkeit über räumliche Skalen und sozioökonomische Gradienten hinweg zu ermöglichen.

Es wurde die Hypothese aufgestellt, dass die Marktdistanz und die Betriebstypologie eine Determinante der landwirtschaftlichen Entwicklung in der Demokratischen Republik Kongo (DRC) ist. Mit zunehmender Marktdistanz sinkt der Bodenfruchtbarkeitsstatus kleinbäuerlicher Anbausysteme trotz des Wohlstands der Bauern. In einer parallel durchgeführten Studie in Äthiopien wurde ergänzend die Hypothese aufgestellt, dass der Bodenfruchtbarkeitsstatus auch durch miteinander verbundene Effekte der Agrarökologie und der Betriebstypologie beeinflusst wird. Da Stickstoff (N) in kleinbäuerlichen Betrieben bekanntermaßen limitierend ist, sind der Erhalt und die nachhaltige Bereitstellung dieses Nährstoffs von entscheidender Bedeutung, um

nischenbasierte Strategien des integrierten Bodenfruchtbarkeitsmanagements (ISFM) zu erreichen. Daher ist das Verständnis der ökologischen Prozesse (Proteolyse, Nitrifikation), die die N-Verfügbarkeit des Bodens durch die Bewirtschaftung organischer Rückstände unter variierenden Bedingungen der Bodenfruchtbarkeit steuern, unerlässlich. Es ist bekannt, dass niedrige Konzentrationen von Lignin (L) und Polyphenolen (PP) im Verhältnis zu N die Zersetzung erleichtern und somit die Abundanz von proteolytischen und nitrifizierenden mikrobiellen Gemeinschaften im Boden stimulieren. Daher wurde die Hypothese aufgestellt, dass qualitativ hochwertige (niedrige (L+PP)/N) Rückstände, die auf Böden mit hohem pH-Wert ausgebracht werden, eine positive Beziehung zwischen dem funktionellen Potenzial proteolytischer enzymatischer Aktivitäten und der Abundanz nitrifizierender Gemeinschaften aufweisen.

Die Erhebungen in der DRC und in Äthiopien hatten folgende Ziele: 1) Bestimmung des wechselseitigen Einflusses von Marktdistanz und Betriebstypologie auf den Bodenfruchtbarkeitsstatus von kleinbäuerlichen Anbausystemen in Süd-Kivu, im Osten der DRC. 2) Die Bewertung des wechselseitigen Einflusses von Agrarökologie und Betriebstypologie auf den Bodenfruchtbarkeitsstatus von Ackerbau- und Viehhaltungssystemen in West- und Zentraläthiopien. Darüber hinaus wurde eine Inkubationsstudie durchgeführt, um die ökologischen Prozesse (Proteolyse, Nitrifikation) besser zu verstehen, die den N-Gehalt durch die Bewirtschaftung organischer Rückstände unter variablen Bedingungen der Bodenfruchtbarkeit kontrollieren. 3) Es sollte überprüft werden, ob potenzielle proteolytische Enzymaktivitäten die archaische und bakterielle Nitrifikationshäufigkeit in Böden mit unterschiedlichem Säuregehalt und organischer Rückstandsbehandlung modulieren.

Die Ergebnisse der Bodenuntersuchung in der DRC zeigten eine abnehmende Bodenfruchtbarkeit mit zunehmender Marktentfernung über alle Betriebstypologien hinweg. Ein signifikanter Einfluss der Betriebstypologie wurde für austauschbares Kalzium und Magnesium gefunden, während der Faktor "Standort" zu einem signifikanten Unterschied des pflanzenverfügbaren Phosphors führte. Außerdem interagierte der Faktor "Standort" mit der Marktentfernung für die Qualitätsindizes des organischen Kohlenstoffs im Boden (SOC). Darüber hinaus wurde die Interaktion von Marktdistanz und Typologie bei den mittelreichen und armen Betrieben deutlich. Die Effekte der Marktdistanz wurden mit der Laufdistanz in Verbindung gebracht, während die Standorteffekte auf Faktoren wie Bodentyp und klimatische Bedingungen zurückgeführt wurden. In Äthiopien wurde ein wechselseitiger Effekt von Agrarökologie und Betriebstypologie festgestellt. Höherer Gesamtkohlenstoff und Gesamtstickstoff wurde auf den Feldern wohlhabender Bauern im Vergleich zu den Feldern armer Bauern im Hochland gefunden. Als Hinweis auf die Bodenqualität wurden die niedrigsten SOC-Stabilitätsindizes in den Böden der wohlhabenden im Vergleich zu den Böden der armen Farmtypologie festgestellt. Diese Unterschiede in der Bodenfruchtbarkeit wurden den landwirtschaftlichen Bewirtschaftungspraktiken zwischen den Typologieklassen und den Unterschieden in der agro-ökologischen Zone zugeschrieben.

Insgesamt zeigte diese Studie, dass Marktzugang, Typologie und Agrarökologie wichtige Einflussfaktoren für die Variabilität der Bodenfruchtbarkeit in den Untersuchungsregionen der DRK und Äthiopien waren. Der Faktor Standort spielte jedoch eine bedeutende Rolle bei der Gestaltung der Bodenfruchtbarkeitsvariabilität, was bedeutet, dass standortspezifische Empfehlungen ein Weg für die Gestaltung des Bodenfruchtbarkeitsmanagements bei Kleinbauern sein könnten. Daraus wurde gefolgert, dass zukünftige nischenbasierte ISFM-Strategien solche gegensätzlichen, aber miteinander verknüpften Faktoren berücksichtigen müssen, einschließlich,

aber nicht beschränkt auf Agrarökologie, Betriebstypologie und Marktzugang. Dies würde die Auswirkungen der Variabilität der Bodenfruchtbarkeit in verschiedenen Regionen reduzieren.

Diese Studie berücksichtigte nur die Landgröße (DRC, Äthiopien), den Viehbestand und Mineraldünger (Äthiopien) als Schlüsselmerkmale, um den Wohlstandsstatus der Zielfarmen zu definieren; zukünftige Studien sollten eine größere Bandbreite an sozioökonomischen und biophysikalischen Faktoren berücksichtigen, einschließlich der Verfügbarkeit von Arbeitskräften, des Haushaltseinkommens außerhalb der Farm und der Geschichte der Bodenbewirtschaftung, um die Variabilität der Bodenfruchtbarkeit genauer zu bestimmen. Dies wird die Genauigkeit der prospektiven Bodenfruchtbarkeitsbewertung über sozioökonomische Gradienten und räumliche Skalen hinweg verbessern. Schließlich wird vorgeschlagen, die Ergebnisse der Inkubationsstudie auf Feldbedingungen auszudehnen, wobei Böden mit einem breiteren Bodensäurebereich und organische Rückstände mit unterschiedlicher biochemischer Qualität berücksichtigt werden. Dies wird die gegebenen Annahmen über die funktionellen Beziehungen zwischen proteolytischen und nitrifizierenden Bodengemeinschaften verifizieren. Insgesamt hat die vorgestellte Studie einen Beitrag zur laufenden Forschung über bestmögliche Bodenfruchtbarkeitsempfehlungen und Wissenslücken über die ökologische Funktionsweise des Bodens geleistet, indem sie ein fortgeschrittenes Verständnis der treibenden Faktoren für die Variabilität der Bodenfruchtbarkeit und der mikrobiellen Funktionsweise des Bodens in kleinbäuerlichen Betrieben in tropischer Umgebung liefert.