



UvA-DARE (Digital Academic Repository)

Greening with black

Biochar-soil amendment for low-emission agriculture

Fungo, B.L.

Publication date

2019

Document Version

Other version

License

Other

[Link to publication](#)

Citation for published version (APA):

Fungo, B. L. (2019). *Greening with black: Biochar-soil amendment for low-emission agriculture*. [Thesis, externally prepared, Universiteit van Amsterdam].

General rights

It is not permitted to download or to forward/distribute the text or part of it without the consent of the author(s) and/or copyright holder(s), other than for strictly personal, individual use, unless the work is under an open content license (like Creative Commons).

Disclaimer/Complaints regulations

If you believe that digital publication of certain material infringes any of your rights or (privacy) interests, please let the Library know, stating your reasons. In case of a legitimate complaint, the Library will make the material inaccessible and/or remove it from the website. Please Ask the Library: <https://uba.uva.nl/en/contact>, or a letter to: Library of the University of Amsterdam, Secretariat, P.O. Box 19185, 1000 GD Amsterdam, The Netherlands. You will be contacted as soon as possible.

SUMMARY IN ENGLISH

Biochar (pyrogenic organic matter) has emerged as an innovative way to improve soil fertility, increase soil carbon sequestration and reduce emission of carbon dioxide (CO₂), methane (CH₄), and nitrous oxide (N₂O) from agricultural soils. However, several questions remain as to the mechanisms responsible for the biochar effect and whether practical benefits for farmers are achievable under field conditions on low-fertility tropical soils. This study aimed at improving understanding of two broad questions: 1) By what mechanisms does biochar affect emission of GHG? 2) Can biochar contribute practical benefits for farmers on low-fertility tropical agricultural soils? The specific research questions addressed in this thesis include; (i) To what extent does biochar quality (feedstock, production temperature, and biochar pre-treatment) affect fluxes of CO₂, N₂O and CH₄? (ii) How does biochar quantity affect nitrogen transformation pathways and hence nitrous oxide emission in contrasting tropical agricultural soils? (iii) Since fluxes of GHGs are known to respond to physical properties such as aeration, is there a linkage between biochar and soil physical properties such as aggregation? (iv) By how much does biochar application to soil contribute to low-emission agriculture in tropical environments? and (v) How long does the residual effect of biochar last in the soil under field conditions?

A series of experiments was used to evaluate some of the propositions about biochar's role in soil processes and associated soil-atmosphere gas fluxes. This study was conducted using Acrisol and Ferralsols both of which are generally low-fertility soils that are widespread across western Kenya, a region where sustainable soil management is extra important yet information on such management is chronically lacking.

In a greenhouse experiment, the effect of biochar quality (source material, pyrolysis temperature and biochar pre-treatment) was investigated in order to determine if surface chemistry and adsorption reactions play a role in regulating GHG emissions (**Objective 1**). maize-stover biochar lowered of N₂O emission by 17% compared to that from Eucalyptus while lower-temperature biochar reduced emission by 3% compared to the higher-temperature biochar. Steam-activated biochar increased CH₄ emission of stover-derived biochar but decreased it for wood-derived one by 14%–70%. A 21% increase in CH₄ emission was observed in soils amended with activated stover-derived biochar compared to the one from Eucalyptus wood, and the 350°C recorded 10% lower values compared to the 550°C. In conclusion, surface chemistry of biochar (as affected by feedstock, pyrolysis temperature and steam activation) plays a significant role as a mechanism in GHG regulation by biochar.

To determine the role of biochar on soil nitrogen transformation and N₂O emission (**Objective 2; Chapter 3**), an incubation experiment and a field trial were used. In the incubation experiment, two application rates of biochar (2% and 4% w/w) were used on two mineralogically contrasting soils (A recently converted Acrisol, an Acrisol under cultivation for >100 years and a Ferralsol under cultivation for >100 years). Gross nitrogen transformation, N₂O and N₂ emission were monitored for 21 days using a ¹⁵N double-labelling technique in an incubation environment. We found that biochar reduced N₂O by 53 to 78 % and that the reduction was higher in the Acrisol than in the Ferralsol. The N₂O/(N₂O+N₂) ratio was reduced in the high OM Acrisol but increased in the Ferralsol whereas no significant difference was observed in the low OM Acrisol. N₂O emission did not follow the same pattern as mineral N, suggesting a disconnection with direct soil N dynamics. The results show evidence of the biochar application shifting the equilibrium towards more N₂ instead of N₂O emission, but provide no indications of a relationship between mineral N dynamics and N₂O production. In

a field trial, mineral nitrogen dynamics, NH₃ and N₂O emissions were monitored for three years. The results show that biochar reduces emissions of both NH₃ and N₂O by ~55% but the reduction was not linked to N dynamics. These results from both experiments thus imply that the observed biochar induced reduction of N₂O emissions from the soil are most likely caused by a conversion of N₂O to N₂, thus limiting N₂O production.

Changing soil physical properties as a process regulating GHG emissions in biochar amended soils was also investigated (**Objective 3; Chapter 4**). A field trial was established on a long-term cultivated Acrisol in western Kenya. Biochar that was used for the experiment was produced from Eucalyptus wood and pyrolyzed to maximum temperature of 550°C. It was then applied at 2.5 t ha⁻¹), alone or in combination with green manure (*Tithonia diversifolia*). The green manure was applied at either 0, 2.5 or 5.0 t ha⁻¹. Mineral nitrogen (as urea) was introduced in as the third factor and applied at either 0 or 120 kg N t ha⁻¹). The experiment was a randomized complete block design with three replicates. Aggregate size distribution as affected by biochar-tithonia-urea input under field conditions was quantified over two years (Chapter 4). Results show that mean weight diameter (MWD) was not affected by biochar alone, but increased by 34±5.2 mm (8%) and 55±5.4 mm (13%), when in combination with either *T. diversifolia* (BT) or urea (BU), respectively, compared to the control. Neither soil respiration nor soil moisture correlated with MWD. SOC negatively correlated with and MWD, but positively correlated with biomass production. The conclusion is that biochar can affect the physical condition of soil, which in turn affects GHG emissions.

To quantify the practical benefits of biochar soil application in contributing to soil improvement, crop yield and low-emission agriculture (**Objective 4**) was investigated using the same field trial as above (**Chapter 5**). Soil organic carbon changes, maize yield and GHG

emissions were monitored for six consecutive seasons, on the same Acrisol as in previous trial, after amendment with manure, mineral fertilizer and biochar. The amendments increased SOC stocks by 0.1 to 1.2 t ha⁻¹ year⁻¹. When applied alone, biochar decreased maize yield by 15% but increased it by ~34% only when combined with external nitrogen sources such as urea or manure. Biochar also increased soil CO₂ emissions (9 to 33%; from either biochar, native soil C or root respiration), reduced soil CH₄ uptake and N₂O emissions by 7 to 59% and 1 to 42%, respectively. No observed seasonal differences. The emission intensity, calculated by combining the contribution of SOC and GHGs, was lower than the control, ranging from 9 to 65%. Therefore, it can be concluded that biochar can offer practically benefits for farmers in the tropical farming systems since it increases SOC and crop yield, as well as contribute to low-emission agriculture.

The question how long the residual effect of biochar lasts in the soil under field conditions (**Objective 5**) was addressed through a field trial described for Question 4 above. Over the three years, the power of biochar to mitigate emission of NH₃ and N₂O was reduced by 53% and 59%, respectively. Therefore, biochar's residual effects under field conditions persist for more than three years.

By monitoring NH₃ and N₂O emissions for three consecutive years on an Acrisol under field conditions, it was found that nitrogen dynamics were not related to the emissions reductions observed, but the effect of biochar continued to be observed. The results of this thesis show that although previous studies report short-term mitigating effects, biochar can reduce NH₃ and N₂O emissions for longer periods, and that N dynamics play a marginal role. Therefore, alternative mechanisms such as surface oxidation potentially explain biochar's residual effect in field soils.

From these studies, it can be seen that biochar plays several direct (surface chemistry and adsorption reactions) and indirect roles (soil aggregation and aeration) in regulating soil carbon and nitrogen turn-over and subsequent emission of CO₂, CH₄ and N₂O. It appears that the net effect of biochar on emission of these gasses is a non-additive contribution of the various mechanisms acting concurrently in the soil system. This study has also revealed that these GHG reduction mechanisms can translate into practical realities in the field and can benefit farmers through soil carbon build-up and crop yield improvement. Biochar can also practically contribute to low-emission agriculture because of its ability to reduce emissions intensity and increase soil carbon stocks.

It is recommended to undertake multi-location field trials involving a wide range of biochar and soil properties should be undertaken to improve accuracy of the estimated effects of biochar on various agronomic and environmental benefits. Such trials should be monitored over long time (5-10 years). The economics of biochar production from a wide range of feedstock such as saw dust, sugarcane bagasse and municipal biomass waste application, including its inclusion in global carbon markets remains an important area for further investigation.

SAMENVATTING IN HET NEDERLANDS

Biochar (pyrogeen organisch materiaal) krijgt steeds meer aandacht als een innovatieve manier om de vruchtbaarheid van de bodem te verbeteren, de koolstofvastlegging in de bodem te verhogen en de uitstoot van kooldioxide (CO₂), methaan (CH₄) en stikstofoxide (N₂O) uit landbouwgronden te verminderen. De mechanismen die verantwoordelijk zijn voor het effect van biochar zijn echter nog niet geheel duidelijk. Evenmin is duidelijk of praktische voordelen van biochar voor boeren haalbaar zijn onder veldomstandigheden op tropische bodems met een lage vruchtbaarheid. Het doel van dit promotieonderzoek was daarom de volgende twee belangrijke vragen te beantwoorden: 1) Via welke mechanismen beïnvloedt biochar de uitstoot van broeikasgassen? 2) Kan biochar praktische voordelen opleveren voor boeren op tropische landbouwgronden met een lage vruchtbaarheid? De hieruit voortvloeiende specifieke onderzoeksvragen in dit proefschrift zijn; (i) In welke mate beïnvloedt de kwaliteit van biochar (bronmateriaal, productietemperatuur en voorbehandeling) de fluxen van CO₂, N₂O en CH₄? (ii) Welke invloed heeft de hoeveelheid biochar op stikstofomzettingroutes en dus op de uitstoot van stikstofoxide in contrasterende tropische landbouwgronden? (iii) Gegeven dat bekend is dat fluxen van broeikasgassen reageren op fysische eigenschappen zoals beluchting: is er een verband tussen biochar en bodemfysische eigenschappen zoals aggregatie? (iv) Met hoeveel draagt biochar-toepassing op de bodem bij aan emissiearme landbouw in tropische omgevingen? en (v) Hoe lang duurt het resteffect van biochar in de bodem onder veldomstandigheden?

Via een reeks experimenten zijn verschillende aannames over de rol van biochar in bodemprocessen en bijbehorende gasfluxen in de bodem geëvalueerd. Het onderzoek werd uitgevoerd met Acrisols en Ferralsols; beide over het algemeen weinig vruchtbare bodems die

veel voorkomen in West-Kenia, een regio waar duurzaam bodembeheer extra belangrijk is, maar waar een chronisch gebrek is aan informatie over dergelijk beheer.

In een kasexperiment werd het effect van biochar-kwaliteit (bronmateriaal, pyrolysetemperatuur en biochar-voorbehandeling) onderzocht om vast te stellen of oppervlaktechemie en adsorptiereacties een rol spelen bij het reguleren van broekasgas- (BKG) emissies (doelstelling 1). Biochar uit maïsstengels biochar verlaagde de N₂O-emissie met 17% vergeleken met biochar uit Eucalyptus, terwijl biochar dat bij lagere temperatuur geproduceerd werd de emissie met 3% verminderde vergeleken met biochar geproduceerd bij hogere temperatuur. Stoomgeactiveerde biochar verhoogde de CH₄-emissie van biochar uit stengels, maar verlaagde deze met 14% –70% voor biochar uit hout. Een stijging van de CH₄-emissie met 21% werd waargenomen in bodems die gemodificeerd waren met geactiveerde biochar uit stengels van Eucalyptus t.o.v. van biochar uit Eucalyptus-hout, en biochar geproduceerd bij 350 ° C leidde tot 10% lagere emissiewaarden dan biochar geproduceerd bij 550 ° C. Dit leidt tot de conclusie dat de oppervlaktechemie van biochar (zoals beïnvloed door bronmateriaal, pyrolysetemperatuur en stoomactivatie) een belangrijke rol speelt als een mechanisme volgens welke biochar de BKG-uitstoot reguleert.

Om de rol van biochar op de stikstoftransformatie in de bodem en de N₂O-emissie (doelstelling 2; hoofdstuk 3) te bepalen, werden een incubatie-experiment en een veldproef uitgevoerd. In het incubatie-experiment werden twee toedieningspercentages van biochar (2% en 4% op gewichtsbasis) gebruikt in twee mineralogisch contrasterende bodems (een recent tot landbouwgrond omgevormde Acrisol, een Acrisol waar reeds > 100 jaar landbouw op plaatsvindt en een Ferralsol waar reeds > 100 jaar landbouw op plaatsvindt. De bruto-stikstofomzetting, N₂O- en N₂-emissie werden gedurende 21 dagen gevolgd met behulp van

een ^{15}N dubbele labelingtechniek in een incubatieomgeving. De resultaten toonden dat biochar de N_2O uitstoot met 53 tot 78% verminderde en dat de reductie hoger was in de Acrisol dan in de Ferralsol. De $\text{N}_2\text{O} / (\text{N}_2\text{O} + \text{N}_2)$ -verhouding bleek na toepassing van biochar verlaagd in de Acrisol met een hoog organische stofgehalte maar nam toe in de Ferralsol. Er werd geen significant verschil waargenomen in de Acrisol met een laag organische stofgehalte. De N_2O -emissie volgde niet hetzelfde patroon als dat van mineraal N, wat duidt op een ontkoppeling van N-dynamiek in de bodem. De resultaten tonen aan dat de toepassing van biochar het evenwicht verschuift naar meer uitstoot van N_2 ten koste van de uitstoot van N_2O , maar geeft geen aanwijzingen voor een verband tussen minerale N-dynamiek en N_2O -productie. In een veldproef werden de dynamiek van minerale stikstof en de NH_3 - en N_2O -emissies gedurende drie jaar gemonitord. De resultaten tonen aan dat biochar de uitstoot van zowel NH_3 als N_2O met ca. 55% vermindert, maar de reductie was niet gekoppeld aan de dynamiek van N. De resultaten van beide experimenten impliceren daarom dat geobserveerde door biochar veroorzaakte reductie van N_2O -emissies uit de bodem hoogstwaarschijnlijk wordt veroorzaakt door een omzetting van N_2O naar N_2 , waardoor de productie van N_2O wordt beperkt.

We onderzochten ook de rol van veranderende bodemfysische eigenschappen als proces dat de uitstoot van broeikasgassen in met biochar gemodificeerde bodems reguleert (doelstelling 3; hoofdstuk 4). Hiertoe werd een veldproef uitgevoerd op een langdurig gecultiveerde Acrisol in het westen van Kenia. De voor het experiment gebruikte biochar werd geproduceerd uit Eucalyptus-hout en gepyrolyseerd tot een maximale temperatuur van 550°C . Het werd vervolgens aangebracht in een hoeveelheid van 2,5 t per hectare, alleen of in combinatie met groene mest (*Tithonia diversifolia*). De groene mest werd in hoeveelheden van 0, 2,5 of 5,0 t per hectare aangebracht. Minerale stikstof (als ureum) werd geïntroduceerd als derde factor en toegepast in hoeveelheden van 0 of 120 kg N t per hectare. Het experiment volgde een

randomized complete block ontwerp met drie herhalingen. Vervolgens hebben we gedurende twee jaar de invloed van toepassing van biochar-tithonia-ureum onder veldomstandigheden op de aggregaat-grootteverdeling gekwantificeerd (hoofdstuk 4). De resultaten lieten zien dat de gemiddelde gewichtsdiameter (MWD) niet werd beïnvloed door alleen biochar, maar toenam met $34 \pm 5,2$ mm (8%) en $55 \pm 5,4$ mm (13%), wanneer biochar werd toegepast in combinatie met *T. diversifolia* (BT) of ureum (BU), respectievelijk, in vergelijking met de controle. Bodemrespiratie noch bodemvocht bleek gecorreleerd met MWD. Bodemorganische stof (SOC) toonde een negatieve correlatie met MWD, maar was positief gecorreleerd met biomassaproductie. De conclusie is dat biochar de fysieke toestand van de bodem kan beïnvloeden, wat op zijn beurt de broeikasgasemissies beïnvloedt.

Om de praktische voordelen van biochar-toepassing voor bodemverbetering te kwantificeren in de context van gewasopbrengst en emissiearme landbouw (doelstelling 4) werd gebruik gemaakt van dezelfde veldproef als hiervoor genoemd (hoofdstuk 5). Veranderingen in organische koolstof in de bodem, maïsopbrengst en broeikasgasemissies werden gedurende zes opeenvolgende seizoenen gevolgd op dezelfde Acrisol als in de vorige proef, na toepassing van dierlijke mest, kunstmest en biochar. De toevoegingen verhoogden de SOC voorraad met 0,1 tot 1,2 ton per hectare per jaar. Wanneer uitsluitend biochar werd toegepast, daalde de maïsopbrengst met 15%. Gecombineerde toepassing van biochar met externe stikstofbronnen zoals ureum of mest verhoogde de opbrengsten met ca. 34%. Biochar verhoogde ook de CO₂-uitstoot in de bodem (9 tot 33%; van biochar, C dat al oorspronkelijk in de bodem zat, of wortelademhaling). Tegelijkertijd verminderde biochar de opname van CH₄ in de bodem en de N₂O-uitstoot met respectievelijk 7 tot 59% en 1 tot 42%. Er werden geen verschillen tussen de seizoenen geconstateerd. De emissie-intensiteit, berekend door de bijdrage van SOC en BKG's te combineren, was lager dan de controle, en varieerde van 9 tot 65%. Daarom kan worden

geconcludeerd dat biochar praktische voordelen kan bieden voor boeren in de tropische landbouwsystemen, omdat het de SOC en gewasopbrengst verhoogt, en bijdraagt aan emissiearme landbouw.

De vraag hoe lang het effect van biochar in de bodem aanhoudt onder veldomstandigheden (doelstelling 5) werd geadresseerd via een veldproef zoals beschreven voor vraag 4 hierboven. Gedurende de drie jaar verminderde het vermogen van biochar om de uitstoot van NH_3 en N_2O te reduceren met respectievelijk 53% en 59%. Dit leidt tot de conclusie dat de effecten van biochar onder veldomstandigheden langer dan drie jaar aanhouden.

Door NH_3 - en N_2O -emissies gedurende drie opeenvolgende jaren op een Acrisol onder veldomstandigheden te volgen, bleek dat hoewel de stikstofdynamiek niet gerelateerd was aan de waargenomen emissiereducties, het effect van biochar wel degelijk werd waargenomen. De resultaten van dit proefschrift laten zien dat, hoewel eerdere studies korte-termijneffecten beschrijven, biochar in staat is NH_3 - en N_2O -emissies voor langere periodes te verminderen, en dat de dynamiek van N een marginale rol speelt. Alternatieve mechanismen zoals oppervlakte-oxidatie verklaren mogelijk het residuele effect van biochar in veldbodems.

Uit ons onderzoek blijkt dat biochar verschillende directe (oppervlaktechemie en adsorptiereacties) en indirecte rollen (bodemaggregatie en beluchting) speelt bij het reguleren van de koolstofomzet en stikstofomzet en de daaraan gekoppelde uitstoot van CO_2 , CH_4 en N_2O . Het lijkt erop dat het netto-effect van biochar op de uitstoot van deze gassen uit een niet-cumulatieve bijdrage bestaat van de verschillende mechanismen die gelijktijdig in het bodemsysteem werken. Onze studie heeft ook aangetoond dat deze BKG-reductiemechanismen zich kunnen vertalen naar praktische toepassing in het veld en boeren

kunnen helpen middels opbouw van de koolstofvoorraad in de bodem en verbetering van de opbrengst van gewassen. Biochar kan via de verlaging van de uitstootintensiteit en verhoging van de koolstofvoorraden in de bodem ook bijdragen aan emissiearme landbouw.

Op basis van het onderzoek wordt aanbevolen om in vervolgonderzoek veldproeven op meerdere locaties uit te voeren met een breed scala aan typen biochar en bodemeigenschappen. Dit is nodig om de vanuit agronomisch en milieu-oogpunt gunstige effecten van biochar nauwkeuriger te kunnen inschatten. Dergelijke onderzoeken moeten gedurende een lange periode (5-10 jaar) worden uitgevoerd. De economische aspecten van de productie van biochar uit een breed scala van uitgangsstoffen zoals zaagmeel, bagasse en huiselijk GFT afval, inclusief de opname ervan in de mondiale koolstofmarkten, vormt ook een belangrijk gebied voor verder onderzoek.

ACKNOWLEDGEMENTS

“What shall I render unto the Lord for all his benefits toward me? I will take the cup of salvation, and call upon the name of the Lord. I will pay my vows unto the Lord now in the presence of all his people” *Psalm 116:12-14 King James Version (KJV)*. My God has enabled me to reach this stage that I only dreamed of as a child. All I have to say is THANK YOU LORD.

I would like to convey my sincere appreciation to Dr. Henry Neufeld and the entire ICRAF family for entrusting me with this noble task. Like the Biblical Timothy (2 Timothy 4:7), I want to say that “*I have fought the good fight, I have finished the race, I have kept the faith*” Thank you for this trust. My fieldwork in Kisumu in Western Kenya was supported by a team of technicians with extraordinary commitment. For this, Linda Ayieta, Benson Gudu, Grace Oluoch and Victor Onyango are duly appreciated. Relatedly, Georges Artsen and Irene Okeyo, the administrative at Kisumu site, always expedited fund management to allow the fieldwork be completed in time. Karlsruhe Institute of Technology (KIT), Institute for Meteorology and Climate Research, Atmospheric Environmental Research (IMK-IFU), through Prof. Dr. Klaus Butterbach-Bahl provided in-kind support for the laboratory experiment (Chapter 3). Dr. Michael Dannenmann of the same institute is acknowledged for the technical support in the project design and data analysis.

The Earth Surface Science team at IBED, University of Amsterdam, supported me during the time I spent at the University while undertaking part of my laboratory experiments. Specifically, Prof. Kasten Kalitz, Ass. Prof. Boris Jansen, did great work in supporting the preparation of manuscripts and organizing the PhD defense ceremony. Dr. Ciara, and Rick Helmus, made the laboratory experiments meticulously smooth and haste. For all their efforts, I appreciate.

My family has been behind me at every step of this tortious journey. The moral and psychological support provided are highly appreciated. To my wife, Judith, you have been with me in the ups and downs, supporting me whenever you could. I have done my part and completed this journey, as you now are. Be strong and work hard as I will pray for you to complete soon.

Finally, the last days of preparing this thesis were spent with the NARO-NaFORRI family of work makes led by the Director of Research Dr. Hillary Agaba, who have supported me in every aspect, psychological, moral, financial and time wise. They have made gigantic contribution to support my travel and stay in Amsterdam for the defense ceremony.

To you all, may the Almighty God bless you.

BIOGRAPHY



Looking back at the first 18 years of my life, I see a young boy doing part-time work as a field assistant for scientists at Makerere University Agricultural Research Institute in Kabanyoro. This era of my life shaped the aspiration for agricultural research to this day. At 16, the choice to take Physics, Chemistry and Biology as the preferred subject combination for Uganda Advance Certificate of Education (UACE) was largely guided by the dream to be like one of those scientists I usually interacted with at Kabanyolo. This subject combination is what later enabled me to joined Makerere University for a BSc. in Forestry. Later, I went on to complete a MSc. in Soil and Water Science at University of Florida, Gainesville, Florida, USA. The three years following the MSc, I worked as National Staff for the Forum for Agricultural Research in Africa (FARA) alongside several top-notch scientists in agriculture and natural resources in Uganda, Rwanda and Congo. Discerning the need to go for further studies, I decided to makes several applications for a PhD program. Gladly, the World Agroforestry Center (ICRAF) offered me a wonderful opportunity to work as a Research Fellow to investigate the relationship between biochar-soil amendment and greenhouse gas emissions in tropical agricultural soils of western Kenya. It was from this research program at ICRAF that this PhD program at the University of Amsterdam was developed. From, ICRAF I returned to Uganda where I now work for National Agricultural Research Organization (NARO) as a Soil Scientist. My hope is that this jump into the world of philosophers will provide the necessary capabilities to contribute to building a sustainable earth. The guiding principle for my life is a quote by Albert Einstein; *“A calm and modest life brings more happiness than the pursuit of success combined with constant restless”*

