

# Faculty of Agricultural Sciences

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

University of Hohenheim

Agroecology in the Tropics and Subtropics

Prof. Dr. Joachim Sauerborn



## **Mitigate Habitat Degradation in the Semiarid Brazil – Potential and Limitation of the Endemic Tree *Spondias tuberosa* Arruda**

Dissertation

Submitted in fulfillment of the requirements for the degree

*doctor scientiarum agrarium* (Dr. sc. agr.)

to the

Faculty of Agricultural Sciences

by

Jan Heiko Mertens

Stuttgart, Germany, 2017

## Summary

Semiarid regions cover 15 % of the global land mass and are inhabited by approximately one billion people. Due to the strong rural character of these regions the well-being of 13 % of the world's population relying directly or indirectly on their ecosystem services. These ecosystem services are allocation of food and forage, purification of water, as well as pollination and seed dispersal, soil protection against desertification, and climate regulation. One of the most densely populated semiarid region is the Caatinga biome, that is located in the Brazilian Northeast. Its climate is hot semiarid (BSh) with little, erratic, and seasonal precipitation, ranging from 250 to 900 mm per year. The average annual temperatures range from 23°C to 27°C. An evapotranspiration above 2000 mm per year results in a negative water balance during 7 to 11 months. The deciduous natural Caatinga vegetation ranges from tropical dry forest to open shrubby vegetation, with a seasonal herbaceous layer.

Loss of its natural vegetation due to wood extraction, pasturing, and inappropriate land-use led to habitat degradation in up to 80 % of the area of the Caatinga biome. A degraded habitat jeopardizes the ecosystem services of the biome and poses a direct threat to its dwellers. In order to mitigate further habitat degradation an alternative land-use strategy is necessary to substitute or cut back prevailing land-use. The agro-industrial utilization of the fructiferous multipurpose tree *Spondias tuberosa* Arruda (Anacardiaceae), endemic to the Caatinga, has the potential to be a viable alternative to current irrigation farming and extensive animal husbandry. Its fruits, seed oil, and leaf extracts are especially attributed to economic and medical benefits.

The current utilization of *S. tuberosa* is limited to extractivism of its fruits that lacks sustainability and appears to be a finite resource. The natural population of *S. tuberosa* presents a weakening natural regeneration with a resultant over aged *S. tuberosa* population. Poor natural regeneration results from a multifactorial problem. Seed export by humans and domestic goats significantly reduce the share of *S. tuberosa* seeds in the Caatinga seed pool and the remaining seed rain is highly infested with the seed beetle *Amblycerus dispar* that destroys the embryo. At seedling stage, browsing goats reduce seedling survival of *S. tuberosa* significantly on disturbed Caatinga sites. Additionally, hunting activities of the Caatinga dwellers significantly reduced the abundance of natural dispersers, which facilitated long distance seed dispersal. Long distance

seed dispersal, however, is an important mechanism for trees to answer to changing environmental conditions by tracking their ecological niche spatially in order to prevent extinction. At this juncture, *S. tuberosa* is not considered endangered based on the criteria of the International Union for Conservation of Nature, due to lacking information for a Red List of Threatened Species threat assessment. However, the combination of expected changing environmental conditions within the Caatinga and restricted natural regeneration of *S. tuberosa*, both discussed in literature, provides a strong evidence, that the *S. tuberosa* faces a high risk to become extinct.

To date, the area cropped with *S. tuberosa* is insignificant and a scientifically-backed cropping system is lacking. Constraining the scientifically-backed cropping system for *S. tuberosa* is its scientific neglect, especially when compared with other Anacardiaceae, and the scientific interest is limited to the region of its occurrence. Problematic for plant physiological studies is the lack of genetically homogeneous plant material of the tree. Virtually, all available information about the response of *S. tuberosa* to abiotic stress or fertilization results from experiments with inhomogeneous plant material. Consequently, reported responses to treatments always contains a source of error due to the different feedbacks of different genotypes of this species. To date, the most homogeneous plant material available are grafted seedlings or seedlings originated from the same mother tree. *S. tuberosa* has not yet been subjected to cloning or breeding so far.

This work aims to provide a first basis for a scientifically-backed, extensive cropping system for *S. tuberosa* on disturbed Caatinga sites meliorated by the use of biochar, clay substrate, and goat manure. The effect of biochar, clay substrate, and goat manure with or without additional mineral fertilization as soil conditioner in planting holes were tested in a 23-months field experiment in a marginal Arenosol. Further, it was studied, whether changed soil physical conditions support establishment and development of one-year-old *S. tuberosa* seedlings. Besides soil physical parameters, the stem circumference growth, root architecture, stem and fine root biomass, root length density, root tuber fresh weight and volume, as well as survival rate of the seedlings were recorded.

At given application rates neither biochar nor clay substrate significantly affected soil physical parameters of the experimental soil. The application rate of 10 % v/v clay substrate, chosen

from literature, seems to be too little to be affective on the experimental Arenosol, that was poor in fine particles ( $< 0.02$  mm). The utilized biochar were proven hydrophobic and presumingly little porous duo to a low pyrolysis temperature. Both combined could explain the absence of a significant biochar-mediated change of soil physical parameters. Goat manure significantly increased total porosity, and significantly reduced soil bulk density. The water content at permanent wilting point, and volumetric water content within the planting holes during the experiment were significantly increased owing to melioration with goat manure. Due to a strong correlation ( $R^2 = 0.75$ ) of water content at field capacity and water content at permanent wilting point, the available water capacity, an important target parameter for plant production, remained unchanged. Since a fast mineralization in the manure treatments was observed, loss of 93 % of the initial soil carbon stock occurred within the first 16 months of the experiment, the positive effect of goat manure application is likely not long-lasting.

Neither stem growth nor seedling survival was significantly affected by initial nutrient supplies or melioration. Conversely, fine root growth and root tuber growth were significantly affected by melioration. Goat manure in the planting holes led to significantly reduced fine root dry matter. Since fine root dry matter showed a weak but significant negative correlation with soil water content, the fine root reduction was evidently caused by increased soil water content resulting from goat manure application. The goat manure application also affected tuber growth significantly, and led to larger tubers. In contrast to the fine roots, root tuber growth did not respond to soil water content but showed a significant correlation with soil bulk density and total porosity. Reduced soil bulk density and increased soil porosity after goat manure addition application led to higher tuber volume.

The absence of treatment effects on stem growth and survival rate, as well as the negative growth response of the fine roots to increased soil water content of *S. tuberosa* seedlings, indicates that the available and utilized plant material is rather undomesticated and strongly adopted to its water and nutrient limited biome.

In order to proceed with the development of a cropping system for *S. tuberosa* and advance in *S. tuberosa* research, domestication and breeding should be in focus. It is necessary to get a reliable cultivar with a stable yield with a shortened time between germination and first fruit set as well as genetically homogeneous plant material. Otherwise fundamental research on

*S. tuberosa* will continue to contain a bias due to different feedbacks of different genotypes. Furthermore, the postulated agro-industrial potential of *S. tuberosa* cannot provide an alternative land-use strategy to help mitigate further habitat degradation within the Caatinga when there is no reliable and short-term monetary benefit for the Caatinga dweller.

## Zusammenfassung

Semiaride Regionen bedecken rund 15 % der Erdoberfläche und werden von circa einer Milliarde Menschen bewohnt. Aufgrund des starken landwirtschaftlichen Charakters dieser Regionen ist das Wohlergehen von etwa 13 % der Weltbevölkerung direkt oder indirekt von ihren Ökosystemdienstleistungen abhängig. Diese Ökosystemdienstleistungen sind unter anderem Bereitstellung von Nahrungs- und Futtermitteln, Reinigung von Süßwasser sowie Bestäubung, Samenverbreitung, Schutz der Böden vor Verwüstung und Regulierung des Klimas. Einer der am dichtesten besiedelten semiariden Regionen ist das Caatinga Biom, welches sich im Nordosten Brasiliens befindet. Das Klima der Caatinga ist heiß semiarid (BSh) mit geringem, unbeständigem, saisonalem Niederschlag, zwischen 250 und 900 mm pro Jahr. Die Jahresmitteltemperatur reicht von 23°C bis 27°C und die jährliche Evapotranspiration ist mit über 2000 mm hoch. Daraus resultiert eine negative Wasserbilanz während 7 bis 11 Monaten in der Caatinga. Die natürliche, sommergrüne Vegetation der Caatinga reicht von einer offenen Buschlandschaft bis zu einem tropischen Trockenwald mit einer saisonalen Krautschicht. Der Verlust dieser natürlichen Vegetation gefördert durch Holzeinschlag, Beweidung und unangemessene Feldwirtschaft führt bis heute zu einem gestörten natürlichen Lebensraum auf 80 % der Fläche der Caatinga. Der gestörte natürliche Lebensraum wiederum beeinträchtigt Ökosystemdienstleistungen des Bioms, was eine direkte Bedrohung für dessen Bewohner darstellt. Um eine weitere Schädigung des natürlichen Lebensraums abzuschwächen ist eine alternative Landnutzung zwingend. Die agrarindustrielle Nutzung des endemischen, fruchttragenden Mehrzweckbaums *Spondias tuberosa* Arruda (Anacardiaceae) hat das Potenzial eine tragfähige Alternative zur gegenwärtigen Bewässerungslandwirtschaft und extensiven Viehhaltung innerhalb der Caatinga zu sein. Besonders seine Früchte, das Samenöl und die Blattextrakte werden mit großem ökonomischen und medizinischen Nutzen assoziiert.

Bis dato beschränkt sich die Nutzung von *S. tuberosa* auf das Sammeln der Früchte von natürlich vorkommenden Individuen. Dieser Nutzung fehlt die Nachhaltigkeit und die Ressource

erscheint endlich zu sein. Denn die natürliche Population von *S. tuberosa* leidet unter einer geschwächten natürlichen Regeneration was zu einer überalterten Population geführt hat. Die geschwächte natürliche Regeneration scheint aus einer multifaktoriellen Störung zu resultieren: Der Export von *S. tuberosa* Samen durch den Menschen und die Hausziege reduziert signifikant den Anteil dieser im Samenpool der Caatinga. Die in der Caatinga verbleibenden Samen leiden fast ausnahmslos unter dem Befall des Samenkäfers *Amblycerus dispar*, der die Embryonen der Samen zerstört. Weiterhin wird auf gestörten Caatinga Flächen die Überlebensrate von *S. tuberosa* Jungpflanzen signifikant durch weidende Ziegen reduziert. Letztlich ist die Verbreitung der *S. tuberosa* Samen über weite Strecken gestört, da das Vorkommen der natürlichen Verbreiter durch Bejagung stark zurückgegangen ist. Die Verbreitung von Samen über weite Strecken ist aber besonders wichtig für den Baum, da es ihm ermöglicht so seiner ökologischen Nische räumlich zu folgen und sich damit an sich ändernde Umweltbedingungen anzupassen. Nach den Kriterien der Internationalen Union zur Bewahrung der Natur und natürlicher Ressourcen ist *S. tuberosa* zum jetzigen Zeitpunkt nicht als gefährdet eingestuft, da für eine Kategorisierung des Baumes für die Rote Liste gefährdeter Arten jegliche Datengrundlage fehlt. Wenn man aber die in der wissenschaftlichen Literatur aufgezeigte zu erwartende Klimaänderung innerhalb der Caatinga und die eingeschränkte natürliche Regeneration von *S. tuberosa* berücksichtigt, erhärtet sich der Verdacht, dass *S. tuberosa* einem hohen Risiko ausgesetzt ist auszusterben.

Bislang ist die Fläche auf der *S. tuberosa* kultiviert wird unwesentlich und eine auf wissenschaftlichen Erkenntnissen basierende Anbaumethode existiert nicht. Problematisch für die Entwicklung einer wissenschaftlich gestützten Anbaumethode ist die Tatsache, dass *S. tuberosa* im Vergleich zu anderen ökonomisch relevanten Arten aus der Familie der Anacardiaceae wissenschaftlich vernachlässigt ist. Das wissenschaftliche Interesse an diesem Baum ist stark regional und beschränkt sich auf die Region seines Vorkommens. Die Aussagekraft von Studien über die Physiologie von *S. tuberosa* wird durch das Fehlen von genetisch homogenem Pflanzenmaterial beeinträchtigt. Bis dato gewonnene Erkenntnisse und verfügbare Informationen über die Reaktion von *S. tuberosa* auf abiotischen Stress oder Düngung resultiert aus Experimenten, die mit inhomogenem Pflanzenmaterial durchgeführt wurden. Folglich beinhalten jegliche Antworten von *S. tuberosa* auf verschiedene Behandlungen stets eine Fehlerquelle aufgrund verschiedener Feedbacks der unterschiedlichen Genotypen

dieser Art. Für *S. tuberosa* existiert noch keine Züchtung und aufgepfropfte Setzlinge oder Setzlinge deren Samen von dem selben Mutterbaum stammen sind das am homogensten verfügbare Pflanzenmaterial.

Die vorliegende Arbeit leistet einen Beitrag hin zur Entwicklung eines mehr wissenschaftlich fundierten extensiven Anbausystems für *S. tuberosa*. Ein Anbausystem, angepasst an gestörte Caatinga Flächen, das die Melioration dieser Flächen mittels Biokohle, Tonsubstrat und Ziegenmist einschließt. Der Wirksamkeit von Biokohle, Tonsubstrat und Ziegenmist als Zuschlagsstoffe für Pflanzlöcher, mit oder ohne Mineraldünger, wurde während einem 23-monatigen Feldversuch auf einem marginalen Arenosol Standort untersucht. Darüber hinaus wurde untersucht, ob die veränderten bodenphysikalischen Eigenschaften das Wachstum und die Entwicklung von *S. tuberosa* Setzlingen unterstützt. Neben bodenphysikalischen Parametern wurde im Feldversuch der Stammumfang, die Wurzelarchitektur, Stamm- und Feinwurzelbiomasse, Wurzellängendichte, Wurzelknollengröße und -frischgewicht, sowie die Überlebensrate der Setzlinge erfasst.

Weder Biokohle noch Tonsubstrat zeigten bei gegebener Aufwandmenge einen signifikanten Effekt auf die bodenphysikalischen Parameter des Versuchsbodens. Die in der Literatur für Tonsubstrat empfohlene Aufwandmenge von 10 % v/v erscheint zu gering, um die bodenphysikalischen Parameter des Arenosol des Feldversuchs zu beeinflussen, der sehr arm an feinen Bodenpartikeln (< 0,02 mm) ist. Bei der verwendeten Biokohle wurde Hydrophobizität nachgewiesen und aufgrund einer niedrigen Pyrolysetemperatur weist die Kohle vermutlich eine geringe Porosität auf. Diese beiden Merkmale können der Grund dafür sein, dass keine biokohlebedingte Veränderung der bodenphysikalischen Parameter beobachtet wurde. Ziegenmist erhöhte signifikant die Porosität des Versuchsbodens und reduzierte signifikant dessen Trockenrohdichten. Der Wassergehalt am permanenten Welkepunkt und der volumetrische Wassergehalt in den Pflanzlöchern wurden durch den Ziegenmist signifikant erhöht. Aufgrund einer starken Korrelation ( $R^2 = 0,75$ ) von Feldkapazität und Wassergehalt am permanenten Welkepunkt blieb die für die Pflanzenproduktion wichtige Maßzahl, die nutzbare Feldkapazität, unverändert. Unter den gegebenen Bedingungen wurde eine sehr starke Mineralisierung der organischen Substanz in der Mistbehandlung beobachtet, 93 % des anfänglichen Kohlenstoffgehalts war nach den ersten 16 Monaten des Versuchs nicht mehr

vorhanden. Aufgrund dessen ist anzunehmen, dass der positive Effekt der einmaligen Anwendung von Ziegenmist auf den Boden nicht von Dauer ist.

Weder das Stammwachstum noch das Überleben der Setzlinge wurde signifikant von der anfänglichen Nährstoffversorgung oder der Melioration beeinflusst, wohingegen die Melioration das Wachstum der Feinwurzeln und das der Wurzelknollen signifikant beeinflusste. Der Ziegenmist in den Pflanzlöchern führte zu signifikant geringerer Feinwurzel-Trockenmasse und die Feinwurzel-Trockenmasse korrelierte schwach aber signifikant mit dem Wassergehalt in den Pflanzlöchern. Der negative Effekt des Ziegenmists auf die Feinwurzel-Trockenmasse resultiert demnach aus dem erhöhten volumetrischen Wassergehalt in den Pflanzlöchern. Die Anwendung von Ziegenmist hatte auch auf das Wurzelknollenwachstum einen signifikanten Effekt und führte zu größeren Knollen. Im Gegensatz zu den Feinwurzeln reagierten die Wurzelknollen nicht auf den erhöhten Wassergehalt im Pflanzloch, aber auf Porosität und Trockenrohddichten. Reduzierte Trockenrohddichte und erhöhte Porosität des Bodens behandelt mit Ziegenmist führte zu größerem Knollenvolumen.

Die Abwesenheit von Behandlungseffekten auf das Stammwachstum und die Überlebensrate *S. tuberosa* Setzling, sowie der negative Effekt des erhöhten Wassergehalts des Bodens auf das Feinwurzelwachstum von *S. tuberosa* ist ein Hinweis darauf, dass das verfügbare und verwendete Pflanzenmaterial eher Wildpflanzen waren. Denn Wildpflanzen aus wasser- und nährstofflimitierten Biomen, so wie *S. tuberosa*, zeigen ein langsames Wachstum auf, das sich durch Nährstoff- bzw. Wasserzugabe nicht positiv ändert.

Um weitere Fortschritte in der Entwicklung einer Anbaumethode zu erzielen, sollte die Domestizierung von *S. tuberosa* und gezielte züchterische Maßnahmen im Fokus stehen. Das dadurch gewonnene genetisch homogene Pflanzenmaterial schafft erst die Voraussetzung für die postulierte agrarindustrielle Nutzung von *S. tuberosa* in einer alternativen Landnutzungsstrategie.



## Resumo

A região semiárida cobre 15 % da superfície terrestre do globo e é habitada por aproximadamente 1 bilhão de pessoas. Devido à forte característica rural dessa região, o bem-estar de 13 % da população mundial depende, direta ou indiretamente, dos serviços ambientais. Entre os serviços ambientais oferecidos estão a provisão de alimento, forragem, água, polinização e dispersão de sementes, proteção do solo contra desertificação e regulação do clima. Uma das regiões semiáridas mais densamente populadas é o bioma Caatinga, localizado no nordeste Brasileiro. Seu clima é semiárido quente (BSh) com precipitação escassa, irregular e sazonal, entre 250 e 900 mm por ano. A temperatura média anual varia entre 23°C e 27°C e conta com evapotranspiração acima 2000 mm por ano o que resulta em um balanço negativo da água durante 7 a 11 meses. A vegetação decídua, natural da Caatinga, varia entre floresta tropical seca a arbustiva aberta, com um estrato herbáceo sazonal.

A perda da vegetação natural devido a extração de madeira, pastagem e uso inapropriado das terras levou a degradação em até 80 % do bioma Caatinga. Um habitat degradado fragiliza os serviços ambientais do bioma e ameaça diretamente seus habitantes. No intuito de diminuir o impacto ambiental é necessário desenvolver uma estratégia alternativa de uso das terras para substituir ou eliminar o modo predominante. O uso agroindustrial da árvore frutífera polivalente *Spondias tuberosa* Arruda (Anacardiaceae), endêmica da Caatinga, tem o potencial de ser uma alternativa viável para a atual agricultura irrigada e pecuária extensiva. Benefícios econômicos e medicinais são atribuídos a suas frutas, óleo da semente e extrato das folhas. O uso atual de *S. tuberosa* está limitado ao extrativismo de suas frutas de forma insustentável e aparenta ser um recurso finito. A população natural de *S. tuberosa* apresenta uma debilidade natural de regeneração o que leva a uma população envelhecida. Uma regeneração natural débil resulta em um problema multifatorial. A dispersão de sementes por humanos e caprinos reduz significativamente a cota das mesmas no banco de sementes da Caatinga e a chuva de semente apresenta altos níveis de infestamento do besouro *Amblycerus dispar* que destrói o embrião. No estágio de muda, o pastoreio de caprinos diminui a sobrevivência de *S. tuberosa* em áreas degradadas da Caatinga. Ademais, a caça realizada pelo moradores da região reduz substancialmente a quantidade de dispersores naturais, que facilitariam o transporte das sementes em longa distância. A dispersão de longa distância é um importante mecanismo das

árvores para responder a mudanças ambientais pois, através dela, é possível acompanhar o nicho espacial ecológico e assim prevenir sua extinção. Nesse contexto, *S. tuberosa* não pode ser considerada em perigo com base nos critérios da União Internacional para a Conservação da Natureza e Recursos Naturais (IUCN), devido à falta de informação na Lista Vermelha de Espécies Ameaçadas. Entretanto, a combinação de uma mudança, já esperada, das condições ambientais da Caatinga e restrições naturais na regeneração de *S. tuberosa*, ambos já discutidos na literatura, fornece uma forte evidência que *S. tuberosa* enfrenta um alto risco de tornar-se extinta.

Atualmente, a área coberta por *S. tuberosa* é insignificante e falta um sistema de manejo com base científica, o que confirma a negligência em que se encontra essa espécie, especialmente se comparada a outras Anacardiaceae. Além disso, o interesse científico é limitado à região em que ocorre. A falta de material geneticamente homogêneo da árvore cria uma barreira para estudos fisiológicos. Praticamente, toda informação disponível sobre a resposta de *S. tuberosa* ao estresse abiótico ou fertilização resulta de experimentos com materiais não-homogêneos. Como consequência, as respostas encontradas a tratamentos sempre contêm fontes de erro devido a distintos feedbacks de diferentes genótipos da espécie. Hoje, o material mais homogêneo disponível são os enxertos de muda ou mudas originadas de uma mesma árvore mãe. *S. tuberosa* que ainda não passou por processos como clonagem ou cultivo.

Este trabalho tem como objetivo promover uma primeira base para um sistema de manejo extensivo de fundamento científico para *S. tuberosa* em áreas degradadas da Caatinga melhorada pelo uso de biocarvão, substrato de argila e esterco de caprinos. Foram testados os efeitos do biocarvão, substrato de argila e esterco de caprino, com ou sem adição de fertilizante mineral como condicionante de solo, em um experimento de campo com duração de 23 meses em Neosolo Quartzarênico empobrecido. Ademais, estudou-se o melhoramento das condições físicas do solo suportam o estabelecimento e desenvolvimento de mudas de um ano de *S. tuberosa*. Além dos parâmetros físicos do solo, foram observados o crescimento da circunferência do caule, a arquitetura da raiz, a biomassa das raízes finas, o comprimento das raízes, o peso fresco e volume do tubérculo da raiz e a taxa de sobrevivência das mudas.

De acordo com os parâmetros usados, com doses de aplicação determinadas, nem o biocarvão nem o substrato de argila afetaram significativamente os parâmetros físicos do solo. O padrão de

aplicação de 10 % v/v substrato de argila, escolhido com base na literatura, parece ser muito pouco para produzir efeito no Neosolo Quartzarênico, que é pobre em partículas finas (< 0.02 mm). O biocarvão utilizado se mostrou hidrofóbico e assim pouco poroso devido a baixa temperatura de pirólise. Essa combinação de fatores poderia explicar a falta de mudança significativa mediada pelo biocarvão nos parâmetros físicos do solo. O esterco de caprino aumentou de forma considerável a porosidade total e reduziu substancialmente a densidade do solo. A adição de esterco de caprinos provocou um aumento notável da umidade no ponto de murcha e a quantidade de água nas covas de plantio durante todo o experimento. Devido a forte correlação ( $R^2 = 0,75$ ) entre a absorção da água e os ponto de murcha e capacidade do campo, a capacidade da água disponível, que representa um importante parâmetro na produção de plantas, permaneceu a mesma. Entretanto, como foi observada uma aceleração na mineralização nos locais tratados com esterco, com perda de 93 % no estoque inicial de carbono durante os 16 meses do experimento, é provável que o efeito positivo do uso do mesmo não dure muito.

A sobrevivência das mudas e o crescimento dos caules não foram afetados de forma significativa pela adição de nutrientes ou pela melhoria do solo. Por outro lado, o melhoramento do solo afetou substancialmente o crescimento das raízes finas e do tubérculo. O uso de esterco de caprinos nas covas de plantio levou a uma acentuada redução da matéria seca das raízes finas. Essa matéria seca apresentou uma fraca, porém significativa correlação negativa com a quantidade de água no solo, o que evidencia que a redução da matéria seca nas raízes finas foi causada pelo aumento da disponibilidade de água resultante do uso de esterco. O uso de esterco de caprinos também levou a um aumento notável no volume dos tubérculos. Ao contrário das raízes finas, o crescimento do tubérculo não apresentou resposta à quantidade de água no solo, mas mostrou significativa correlação com a densidade do solo e a porosidade total. Após a aplicação do esterco, o solo apresentou uma redução em sua densidade e aumento na porosidade, o que levou a um aumento no volume do tubérculo.

A ausência de efeito dos tratamentos no crescimento do caule e no índice de sobrevivência, assim como um efeito negativo no crescimento de raízes finas das mudas de *S. tuberosa* devido ao aumento na quantidade de água indicam que o material vegetal usado é provavelmente selvagem e muito bem adaptado à escassez de água e de nutrientes de seu bioma.

Para desenvolver um sistema de manejo para *S. tuberosa* e promover um avanço na pesquisa sobre essa espécie, é necessário focar na domesticação e cultivo das mudas. É preciso desenvolver um cultivo confiável com colheita estável e menor período entre a germinação e aparição dos primeiros frutos assim como manter disponível material vegetal geneticamente homogêneo. Do contrário, pesquisas sobre *S. tuberosa* continuarão a apresentar falhas devido a diferentes respostas de diferentes genótipos. Além disso, o potencial agroindustrial postulado de *S. tuberosa* não servirá como alternativa à estratégia de uso da terra para ajudar a mitigar a degradação na Caatinga se não gerar benefício monetário viável e a curto período para seus habitantes.

## Notes on Publications

This cumulative dissertation is based on four scientific articles submitted to international peer-reviewed journals. At the date of the submission of this dissertation, the four articles have been published. These four article are:

### Chapter 2:

Mertens, J., Almeida-Cortez, J.S., Germer, J., Sauerborn, J. (2015): Umbuzeiro (*Spondias tuberosa*): A Systematic Review. *Rev. Bras. Ciênc. Ambient.* 36, 179–197.  
doi:10.5327/Z2176-947820151006

### Chapter 3:

Mertens, J., Germer, J., Siqueira Filho, J.A., Sauerborn, J. (2016): *Spondias tuberosa* Arruda (Anacardiaceae), a Threatened Tree of the Brazilian Caatinga? *Braz. J. Biol.* Ahead of print. doi:10.1590/1519-6984.18715

### Chapter 4:

Mertens, J., Germer, J., Araújo Filho, J.C., Sauerborn, J. (2017): Effect of Biochar, Clay Substrate, and Manure Application on Water Availability and Tree Seedling Performance in a Sandy Soil. *Arch. Agron. Soil Sci.* 63, 969–983.  
doi:10.1080/03650340.2016.1249473

### Chapter 5:

Mertens, J., Germer, S., Germer, J., Sauerborn, J. (2017): Comparison of Soil Amendments for Reforestation with a Native Multipurpose Tree Under Semiarid Climate: Root and Root Tuber Response of *Spondias tuberosa*. *For. Ecol. Manag.* 396, 1–10.  
doi: 10.1016/j.foreco.2017.04.010

A list of additional publications, to which I contributed as coauthor or first author and developed in the context of this dissertation, but not considered in the main section is placed in the Annex.