



Natural Capital and Its Services in the Caatinga Phytogeographic Domain

Capital natural e seus serviços no Domínio Fitogeográfico da Caatinga

Eunice Maia de Andrade*¹, Deodato Nascimento Aquino², Francisco José Canafístula³

Abstract: A new millennium has begun, and a new paradigm in exploitation of natural resources to generate products has emerged. In this sense, a model in line with local environmental reality and based on the sustainable development goals (SDG) proposed by the UN is required. The document addresses the suitability of natural capitals in the Caatinga phytogeographic domain (CPD) for generating products, encompassing primary (solar energy and rainfall) and secondary (soil and vegetation) natural resources. These resources have well-defined scarcity (water, soil, and vegetation) and abundance (solar radiation) characteristics. Water is scarce due to uncertain rainfall and frequent droughts. Due to their fragility, soils, when shallow and/or with a low organic matter content, are susceptible to erosion and salinization. In turn, vegetation is scarce due to low potential for biomass production (50% of the area has a biomass production below 2 Mg ha⁻¹). As for solar energy, there is no uncertainty regarding its occurrence in the CPD. Moreover, the region has the highest solar radiation intensities in Brazil, with daily averages ranging from 4.8 to 6.0 Kwh m⁻² within a year. Therefore, a new model must be adopted, in which socioeconomic development is based on the potential of local natural resources. In short, abundant resources should be prioritized over scarce ones. Furthermore, exploitation must be democratized and not only in the hands of few privileged individuals.

Key words: Tropical Semiarid – natural resources. Solar energy. Rural development. Rainfall – droughts. Caatinga. Ecosystem services.

Resumo: O novo milênio começou e a busca de um novo paradigma na exploração dos recursos naturais na geração de produtos fez-se necessária: um modelo que esteja em consonância com a realidade ambiental local e fundamentado nos objetivos do desenvolvimento sustentável (ODS) propostos pela ONU. Esse documento aborda a aptidão do capital natural no domínio fitogeográfico da Caatinga (DFC) para a geração de produtos: recursos naturais primários – Energia Solar e Precipitação; e secundários – Solo e Vegetação. Esses recursos investigados apresentam características de escassez (água, solo e vegetação) e abundância (energia solar) bem definidas. A água é escassa pela incerteza do regime pluviométrico e frequente ocorrência de secas; os solos em razão da sua fragilidade, quando rasos e/ou com baixo teor de matéria orgânica, são susceptíveis a erosão e salinização; a vegetação considera-se escassa pelo baixo potencial de produção de biomassa: 50% do território apresenta produção de biomassa inferior a 2 Mg ha⁻¹. Relativamente ao recurso energia solar, não existe incerteza quanto à sua ocorrência no DFC: a região apresenta as maiores intensidades de radiação solar do Brasil, com média diária, no ano, variando de 4,8 a 6,0 Kwh m⁻². Portanto, é imperativo se adotar novo modelo, no qual o desenvolvimento socioeconômico se fundamente na potencialidade dos seus recursos naturais. Enfim, precisa-se parar de trabalhar com o que é escasso e buscar explorar o que se tem em abundância. Entende-se, também, que essa exploração deve ser democratizada e não concentrada nas mãos dos poucos afortunados.

Palavras-chave: Semiárido tropical – recursos naturais. Energia solar. Desenvolvimento rural. Precipitação – secas. Caatinga. Serviços ecossistêmicos.

*Corresponding author

Submitted for publication on 22/10/2022, approved on 23/10/2022 and published on 08/12/2022

¹Ph.D. Natural Resources, Bolsista de Pesquisa CNPq. Department of Soil and Water Conservation, Federal University of the Semi-Arid Region. Endereço: Rua Francisco Mota, 572, Mossoro CEP 59625-900, RN, Brazil. E-mail: eandrade@ufc.br

²D.Sc. in Agricultural Engineering, Federal University in Ceará – UFC, Perito Federal Agrário do INCRA- SR(02)/Ceará – Av. Américo Barreira, 4700 - Bairro Bela Vista, CEP: 60.442-800, Fortaleza, Ceará, Brazil. E-mail: Deodato.aquino@fla.incra.gov.br

³D.Sc. in Agricultural Engineering, Federal University in Ceará – UFC.

INTRODUCTION

The natural capital uses adopted by humans throughout history have almost always dissociated socioeconomic issues from environmental biophysical aspects. Besides knowing local environmental biophysical processes and socioeconomic reality, existing conflicts among development goals, local aptitude, and natural resources-bearing capacity should be identified (ANDRADE *et al.*, 2020). Moreover, the higher biomass demands due to world's population growth, aggravated by climate changes, will pose enormous pressure on natural resources, compromising ecosystem products and services (AGUIRRE-GUTIÉRREZ *et al.*, 2019; CASTANHO *et al.*, 2020b). In this context, forests will be destroyed (NGWIRA *et al.*, 2014), soil and water quality degraded, and/or food security challenged (ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, 2018).

The mitigation of climate change impacts on dry tropical regions should be based on a development model that consider natural capital aptitude and abundance in these environments (ANDRADE *et al.*, 2020). In the dry tropical regions of the globe, interactions between primary natural resources (solar energy and rainfall) with their geological basis gave rise to a vegetation classified as tropical dry forests (TDF), which are present on five continents.

TDF extension is about 1.05 million km², of which 54% are in South America (MILES *et al.*, 2006; HUANG *et al.*, 2017). These forests, in addition to housing the world's poorest populations (DEXTER *et al.*, 1218), offer a wide range of ecosystem services that support several subsistence farming systems. For instance, the Miombo region in Africa provides livelihoods for over 100 million people in urban and rural areas (DEWEES *et al.*, 2011). In the Americas, these areas extend from Central America to North of Colombia, Venezuela, and Argentina, passing through western Paraguay, eastern Bolivia to northeastern Brazil (MORO *et al.*, 2016).

INTRODUÇÃO

Os modelos clássicos do uso do capital natural adotados pelo homem ao longo da história quase sempre dissociaram as questões socioeconômicas dos aspectos biofísicos ambientais. Para além do conhecimento da dinâmica dos processos biofísicos do ambiente e da realidade socioeconômica, é também necessário identificar os conflitos que possam existir entre as metas de desenvolvimento e a aptidão e capacidade de suporte dos recursos naturais que compõem o ambiente (ANDRADE *et al.*, 2020). Sabe-se que a maior demanda por biomassa decorrente do crescimento da população terrestre, agravada pelas mudanças climáticas, resultará em forte pressão sobre os recursos naturais, comprometendo os produtos e serviços ecossistêmicos (AGUIRRE-GUTIÉRREZ *et al.*, 2019; CASTANHO *et al.*, 2020b). Esse comprometimento ocorrerá pela destruição das florestas (NGWIRA *et al.*, 2014), pela degradação da qualidade do solo e da água (LAL *et al.*, 2018) e/ou pelo desafio da segurança alimentar (ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, 2018).

Entende-se que a mitigação dos impactos decorrentes dos cenários de mudanças climáticas que se delineiam para as regiões tropicais secas deverá se fundamentar no desenvolvimento de um modelo que considere a aptidão e a abundância do capital natural existente no ambiente (ANDRADE *et al.*, 2020). As interações dos recursos naturais primários (energia solar e precipitação) e a base geológica das regiões tropicais secas do globo deram origem à vegetação classificada como florestas tropicais secas (FTS), presentes em extensa área do globo, nos cinco continentes.

A extensão das FTS é de aproximadamente 1,05 milhão de km², dos quais 54% estão localizadas na América do Sul (MILES *et al.*, 2006; HUANG *et al.*, 2017). Essas florestas, além de abrigarem as populações mais pobres do mundo (DEXTER *et al.*, 1218), oferecem larga gama de serviços ecossistêmicos que suportam diferentes sistemas da agricultura de subsistência. Por exemplo, a região do Miombo, na África, provê a sobrevivência de mais de 100 milhões de pessoas em áreas urbanas e rurais (DEWEES *et al.*, 2011). Nas Américas, as FTS se estendem desde a América Central, Norte da Colômbia, Venezuela e Argentina, Oeste do Paraguai, Leste da Bolívia, até ao Nordeste do Brasil (MORO *et al.*, 2016).

In Brazil, TDF is the largest tropical semi-arid ecoregion in South America (MILES *et al.*, 2006, ALLEN *et al.*, 2017), and is known as the Caatinga Phytogeographic Domain - CPD (ARAÚJO FILHO, 2013; MORO *et al.*, 2016). It is located in the Brazilian semi-arid region (Figure 1), has a geographical extension of about 912,000 km², and is home to 27 million people (IBGE, 2018). It is ranked as the most populous semi-arid region in the world. Their natural resources have been exploited in the wrong way, following the motto: “take the product I want and not what the environment offers me”.

A FTS brasileira é a maior ecorregião semiárida tropical da América do Sul (MILES *et al.*, 2006, ALLEN *et al.*, 2017), sendo conhecida como o Domínio Fitogeográfico da Caatinga -DFC (ARAÚJO FILHO, 2013; MORO *et al.*, 2016). Encontra-se encravada no semiárido brasileiro (Figura 1), com extensão geográfica de aproximadamente 912 mil km² e abriga 27 milhões de pessoas (IBGE, 2018), classificando-se como o semiárido mais populoso do mundo. Trata-se de uma região onde os recursos naturais têm sido explorados de forma equivocada, seguindo a máxima: “retirar o produto que eu quero e não o que o ambiente me oferece”.

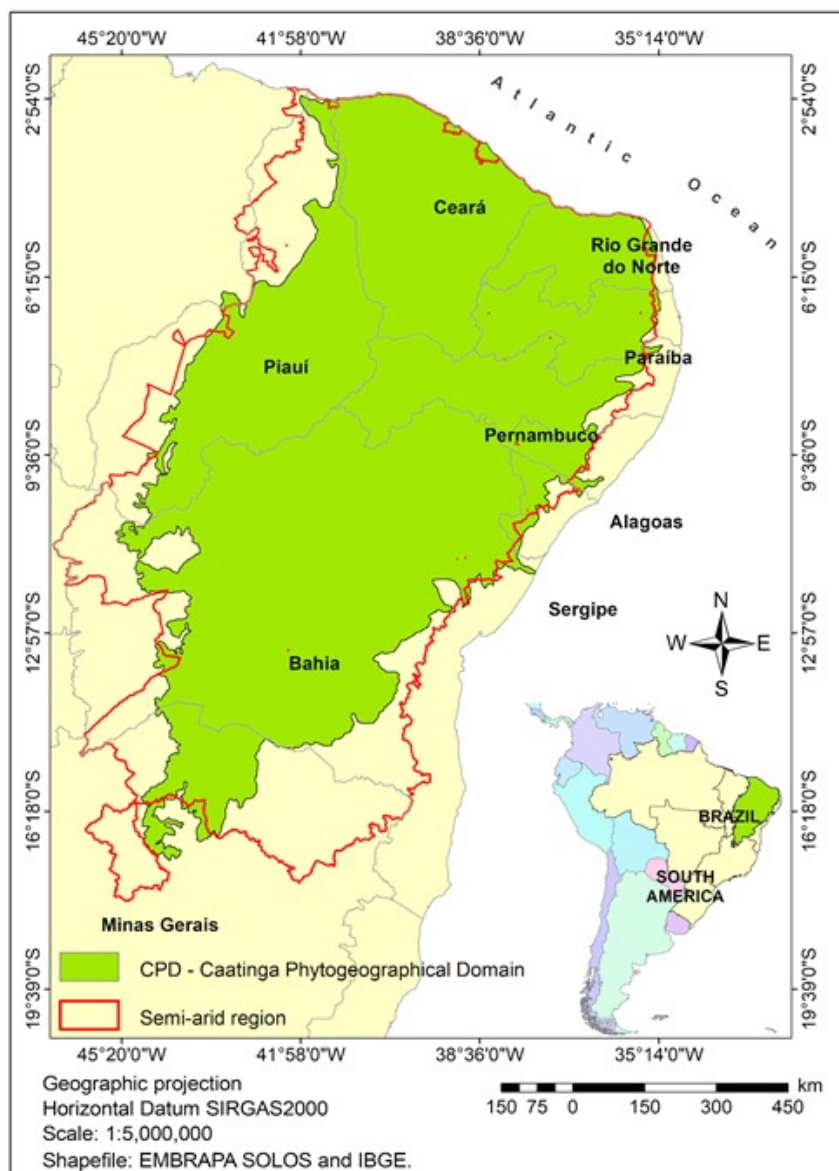


Figure 1 - Location of the Brazilian semi-arid and Caatinga Phytogeographic Domain areas.

Figura 1 - Localização do Semiárido brasileiro e o domínio fitogeográfico da Caatinga.

Nowadays, even in an incipient way, there is an emergence of a new paradigm regarding the exploitation of natural capital. In this new paradigm, natural capital has economic value, not only for the benefits generated to the human population, directly or indirectly, but also for not depleting or degrading its own resources. Finally, the use of natural resources has already been focused on the sustainable development goals (SDGs) proposed by the UN in 2015 (UNITED NATIONS, 2019) and in Ecosystem Services and Biodiversity proposed by FAO in 2019 (FAO, 2019).

The fact is that there is a time when actions need to be in line with the local environmental reality and consider goods and services generated by natural capital. In this context, this review aimed to approach production and services of natural capital in the Caatinga phytogeographic domain (CPD).

CAATINGA PHYTOGEOGRAPHIC DOMAIN CPD

CPD is the result of interactions between primary natural resources – solar energy and rainfall (inputs) over geological eras (Tertiary and Quaternary) with geographic position (Figure 2). These interactions promote the evolution and adaptation to environmental conditions. Arrangements over the ages have defined CPD as a transitional environment between savannah and rainforest (DEXTER *et al.*, 2018).

Nos dias atuais, mesmo de forma incipiente, percebe-se o surgimento de um novo paradigma a respeito da exploração do capital natural. No novo paradigma, o capital natural passa a ter um valor econômico não só pelos benefícios gerados à população humana de forma direta ou indireta, mas, também, pela não exaustão ou degradação dos próprios recursos. Enfim, já se busca um uso dos recursos naturais com o olhar nos objetivos de desenvolvimento sustentável (ODS) proposto pela ONU em 2015 (UNITED NATIONS, 2019) e nos Serviços Ecossistêmicos e Biodiversidade proposto pela FAO em 2019 (FAO, 2019).

O fato é que se vivencia uma época em que as ações necessitam estar em consonância com a realidade ambiental local e considerar os bens e serviços gerados pelo capital natural. Nesse contexto, objetiva-se com essa revisão abordar produção e serviços do capital natural no domínio fitogeográfico da Caatinga (DFC).

DOMÍNIO FITOGEOGRÁFICO DA CAATINGA (DFC)

O DFC é o resultado de interações ocorridas entre recursos naturais primários – energia solar e precipitação (entradas) ao longo de eras geológicas (Terciária e Quaternária) – e posição geográfica (Figura 2), em um processo de evolução e adaptação às condições ambientais. Os arranjos ocorridos ao longo das eras definiram o DFC como um ambiente de transição entre a savana e a floresta tropical (DEXTER *et al.*, 2018).

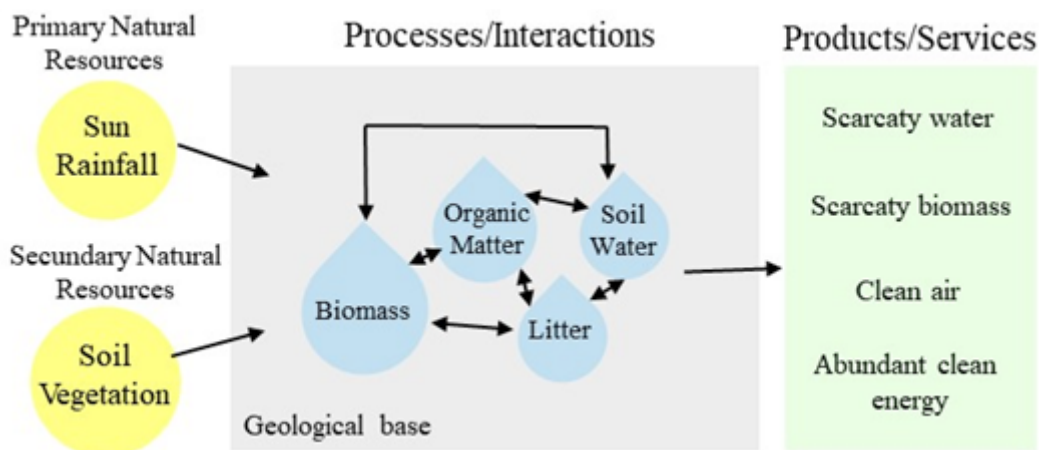


Figure 2 - Systemic diagram of the processes and interactions between natural resources in the Caatinga Phytogeographic Domain (CPD).

Fonte: Author.

Figura 2 - Diagrama sistêmico dos processos e interações dos recursos naturais no Domínio Fitogeográfico da Caatinga (DFC).

Fonte: Autor.

CPD occupies about 862,818 km² of the Brazilian Northeast and corresponds to 86% of the Brazilian semi-arid and 10.1% of the national territory (IBGE, 2019). CPD is a low-latitude TDF (~2 to 16° - Fig1) and has two well-defined climatic seasons (dry and wet). It is found between the isohyets of 400 and 1800 mm, and its rainfall regime is characterized by a high space-time variability, alternating dry years with rainy years (ANDRADE *et al.*, 2017). Its phytogeography resembles the northeastern semi-arid region, which is also known as the *drought polygon* (Fig1).

The region hosts about 1700 species, of which 300 or more are endemic (PAGANO *et al.*, 2013; MORO *et al.*, 2014). Although CPD *stricto sensu* is characterized by xerophytic and gnarled plants (shrub, small trees, and seasonal herbaceous stratum), other vegetation physiognomies can be found. Such traits are closely related to climate (SILVA DE MIRANDA *et al.*, 2018) and soil (SANTOS *et al.*, 2012) heterogeneity. CPD contains mosaics of semideciduous trees, arboreal forests (Atlantic Forest remaining), as well as cactus, shrubs, and exposed soil in the drier areas (MORO *et al.*, 2016).

Primary Natural Resources

Tropical semi-arid regions on the world are characterized not only by water deficit, but also a high positive solar energy balance. Solar radiation availability promotes significant losses of water resources due to high evaporative rates. While dry areas located in temperate regions have lower evaporation rates during winter and autumn, tropical semi-arid has similar evaporation rates throughout the year.

The CPD in the Brazilian semi-arid region has peculiarities, among which: a) world's dry region with the highest population (27 million inhabitants); b) the rainiest semi-arid regions in the world (average of 773 mm year⁻¹), with a wet-surface evaporation rate from 1500 mm per year in coastal regions to 3000 mm per year in the continental area (MOLLE, 1989). Of the total rainfall that occurred, 88% turned into evapotranspiration, 9% into surface runoff, and only 3% into underground runoff (CAMPOS, 2011).

O DFC está inserido no Nordeste brasileiro em aproximadamente 862.818 km², correspondendo a 86% do semiárido brasileiro e 10,1% do território nacional (IBGE, 2019). O DFC é uma FTS de baixas latitudes (~ 2 a 16° - Figura 1) com duas estações climáticas bem definidas – seca e chuvosa. Encontra-se entre as isoietas de 400 a 1800 mm, sendo as precipitações caracterizadas por alta variabilidade no espaço temporal, alternado anos secos por anos chuvosos (ANDRADE *et al.*, 2017). A extensão fitogeográfica do DFC se assemelha ao semiárido nordestino, também conhecido como *polígono das secas* (Figura 1).

A região abriga aproximadamente 1700 espécies, das quais 300 ou mais são endêmicas (PAGANO *et al.*, 2013; MORO *et al.*, 2014). Apesar do DFC (*stricto sensu*) ser caracterizado por plantas xerófitas e retorcidas (combinação de arbusto e árvores de pequeno porte com camada sazonal do estrato herbáceo), há outras fisionomias da vegetação. A distribuição dessas fisionomias está estreitamente relacionada com a heterogeneidade do clima (SILVA DE MIRANDA *et al.*, 2018) e do solo (SANTOS *et al.*, 2012). No DFC, encontra-se mosaicos de semidecíduas, florestas arbóreas (resíduo da Mata Atlântica), bem como cactáceas, arbustos e solo exposto nas áreas mais secas (MORO *et al.*, 2016).

Recursos Naturais Primários: Precipitação

As regiões semiáridas tropicais do globo são caracterizadas não só pelo déficit hídrico, mas, também, pelo elevado saldo positivo da energia solar. A disponibilidade de energia solar resulta em perdas significativas do escasso recurso água pelas elevadas taxas evaporativas. Enquanto as áreas secas situadas em regiões de clima temperado apresentam menores taxas de evaporação durante as estações do inverno e outono, o semiárido da zona tropical apresenta taxa de evaporação semelhante ao longo do ano.

O DFC, semiárido brasileiro, se caracteriza por peculiaridades que o torna uma região distinta, entre as quais cita-se: a) região seca do globo de maior densidade demográfica, 27 milhões de habitantes; b) regiões semiáridas mais chuvosas do globo, com precipitação média anual em 773 mm ano⁻¹; c) taxa de evaporação da superfície líquida variando de 1500 mm por ano, nas regiões do litoral, a 3000 mm ano na área continental (MOLLE, 1989). Do total das chuvas ocorridas, 88% se transformam em evapotranspiração, 9% em escoamento superficial e apenas 3% em escoamento subterrâneo (CAMPOS, 2011).

Because it is a tropical region of low latitude and altitude, there is no meltwater, so rain is the only water input. As a result, rivers are almost entirely naturally intermittent or ephemeral. In periods of drought, it is common for rivers to remain naturally dry for more than 18 months, that is, low water availability. In addition to water deficit, the region is also marked by dry years alternating with years of floods.

The first record of drought in the CPD dates back to 1583, through the letters of the Portuguese Jesuit Fernão Cardim (NETO, 2006). Throughout the history of occupation and exploitation of the CPD, droughts are frequent (MARENGO *et al.*, 2017; ANDRADE *et al.*, 2017), one of the most serious being that from 1776 to 1778, when there was a high rate of human and cattle mortality. The other great drought was the one recorded from 1888 to 1889, period in which the dam policy begins with the Cedro dam project.

Inducing sources

Given its proximity to the equator ($2^{\circ}54' - 16^{\circ}18'S$), CPD has only two climatic seasons (wet and dry). The region is mainly subject to the influence of high subtropical pressures linked to semi-permanent South Atlantic anticyclone (GUERREIRO *et al.*, 2013), whose performance is conditioned by Hadley (southern) and Walker (zonal) circulations (FERREIRA; MELO, 2005). This influence generates the occurrence of rainfall at different times (Figure 3).

In part of the area near the equator, rainy season is between January and May, with the highest rainfall between March and April. It is when the Intertropical Convergence Zone (ITCZ) migrates towards the Southern Hemisphere and reaches latitudes up to 10° South. The ascending air movement, associated with the ITCZ, usually causes intense rainfall of convective origin, without having a well-defined periodicity of occurrence (SUN *et al.*, 2007; ALVES *et al.*, 2009).

Por se tratar de uma região tropical de baixas latitudes e altitudes, não existe água de degelo, portanto, a chuva é a única entrada de água. A resultante dessa característica são rios, em quase sua totalidade, naturalmente intermitentes ou efêmeros. Em períodos de seca é comum os rios permanecerem naturalmente secos por mais de 18 meses, o que expressa a baixa disponibilidade hídrica da região. Além desta característica de déficit hídrico, a região é, também, marcada por anos secos alternados por anos de cheias.

O primeiro registro de seca no DFC é datado do ano 1583 através das cartas do jesuíta português Fernão Cardim (NETO, 2006). Ao longo de toda a história de ocupação e exploração do DFC o registro de secas é frequente (MARENGO *et al.*, 2017; ANDRADE *et al.*, 2017), sendo uma das mais grave a de 1776 a 1778, em que ocorreu alto índice de mortalidade humana e de rebanho bovino. A outra grande seca foi a registrada de 1888 a 1889, período em que se inicia a política da açudagem com o projeto do açude Cedro.

Fontes indutoras

Pela sua proximidade ao equador ($2^{\circ}54' - 16^{\circ}18'S$), o DFC apresenta somente duas estações climáticas - úmida e seca. A região é submetida, principalmente, à influência de altas pressões subtropicais vinculadas ao anticiclone semipermanente do Atlântico Sul (GUERREIRO *et al.*, 2013), cuja atuação é condicionada pelas circulações de Hadley (meridional) e de Walker (zonal) (FERREIRA; MELO, 2005). Esta influência gera a ocorrência de um regime de chuvas em épocas distintas (Figura 3).

Na parte do território mais próxima ao equador, a estação chuvosa ocorre entre os meses de janeiro e maio, com as maiores alturas pluviométricas em março-abril, época que a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) migra em direção ao hemisfério Sul e atinge latitudes de até 10° Sul. O movimento ascendente do ar, associado à ZCIT, origina precipitações habitualmente intensas, de origem convectiva, sem apresentar periodicidade de ocorrência bem definida (SUN *et al.*, 2007; ALVES *et al.*, 2009).

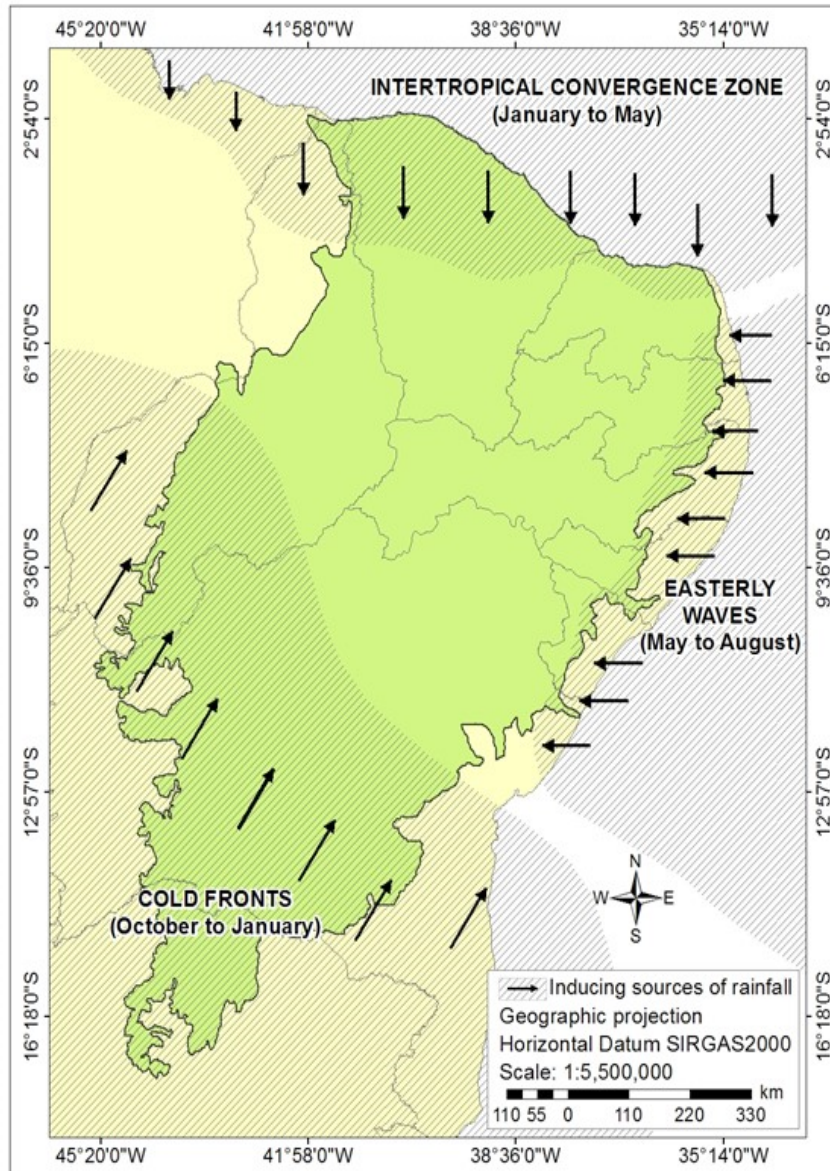


Figure 3 - Prevailing inducing sources.

Figura 3 - Fontes indutoras predominantes.

Fonte: Andrade et al. (2020).

In the southern of the CPD, rains begin in October and are concentrated between December and January. These rains result from cold fronts that advance towards the equator and reach a latitude of about 10° South (FERREIRA; MELO, 2005). In the eastern (Figure 3), rainy season begins in May and extends until August, concentrating between June and July. These rains are mainly induced by easterly waves, which are water masses from the coast of Africa towards the Brazilian east coast (TORRES; FERREIRA, 2011). When oceanic and atmospheric conditions are favorable for a larger air mass displacement, they advance over the central and northern of the CPD, with the rainy season lasting until July or August (GUERREIRO *et al.*, 2013).

Na região Sul do DFC, as chuvas se iniciam em outubro e se concentram entre os meses de dezembro e janeiro. São chuvas decorrentes de frentes frias que avançam em direção ao equador e atingem latitudes em torno de 10° Sul (FERREIRA; MELO, 2005). Na região Leste (Figura 3), a estação chuvosa inicia em maio, prolongando-se até agosto, com concentração nos meses de junho e julho. São chuvas cuja principal fonte indutora são as ondas de Leste, as quais constam de massas úmidas que se deslocam desde a costa da África até o litoral Leste do Brasil (TORRES; FERREIRA, 2011). Quando as condições oceânicas e atmosféricas estão favoráveis a um maior deslocamento das massas de ar, essas avançam sobre a área central e Norte do território do DFC, e a estação chuvosa pode se prolongar até julho ou agosto (GUERREIRO *et al.*, 2013).

Spatial-temporal variability

In the CPD, high spatial-temporal variability of rainfall is a more striking feature than total annual rainfall. Average annual precipitation is 773 mm (Table 1 and Figure 4) and, in a single month, it can rain 70% of the annual total (ANDRADE *et al.*, 2017). Moreover, rainy season has no right time to starts or ends.

Variabilidade espaço temporal

O regime pluviométrico do DFC se caracteriza mais pela alta variabilidade espaço-temporal das chuvas do que pelo total anual precipitado. A precipitação média anual da região é de 773 mm (Tabela 1 e Figura 4), podendo em um único mês precipitar 70% do total anual (ANDRADE *et al.*, 2017). Não há uma época certa para o início ou para o final do período das chuvas.

Table 1 - Average annual rainfall in the Caatinga Phytogeographic Domain (CPD)

Tabela 1 - Precipitação pluviométrica média anual em áreas do Domínio Fitogeográfico da Caatinga (DFC)

Isoline (mm)	Area (%)	Average rainfall (mm)
<400	0.6	24.0
400-600	21.9	109.5
600-800	38.6	270.2
800-1000	30.2	271.8
1000-1200	7.1	78.1
>1200	1.6	19.2
Annual Average	100.0	772.8

Fonte: (ANDRADE *et al.*, 2020).

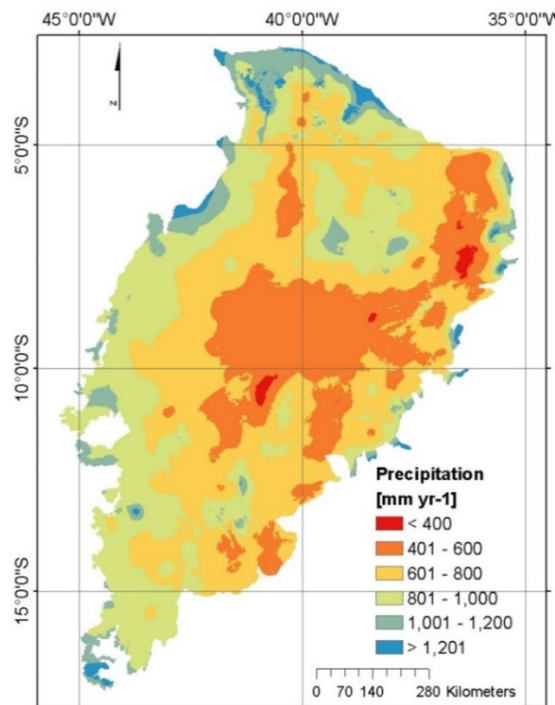


Figure 4 - Isohyets of the Caatinga Phytogeographic Domain (CPD) areas.

Figura 4 - Isoietas de área do Domínio Fitogeográfico da Caatinga (DFC).

Fonte: (ANDRADE *et al.*, 2020).

Although 21% of the region receives an annual rainfall below 600 mm and 0.6% below 400 mm (Table 1 and Figure 4), 75% of the area lies between the 600- and 1200-mm isohyets, and 1.7% has an annual total above 1200 mm. Such spatial variability of rainfall results in distinct microclimates in the CPD, ranging from desert in the central region to rainy in the coastal area (Figure 4) and in the mountains, which is due to orographic effects. In these regions ($p > 1200$ mm), records of total annual rainfall above the 1800-mm isohyet are found, as is the case in the city of Guaramiranga, in the state of Ceará (Brazil).

The largest water gaps of CPD are between the northern coast of Rio Grande do Norte and the central region of the area. The gap on the western side of the territory, in a north-south direction (Figure 4), is determined by the downwind effect of the Borborema Plateau, with the presence of dry air masses. A large land area with low rainfall is between latitudes 8° and 11° S. At these latitudes, the lowest rainfall is determined by a low influence of ITCZ and polar fronts in the region (Figure 3), that is, not always ITCZ or polar fronts arrive with masses moist enough to promote higher rainfall.

Rainfall events have a unimodal distribution, with a high concentration in three or four months of the year (ANDRADE *et al.*, 2017). On average, 84% of the total annual rainfall occurs during the wet season (Table 2). An area of 709 km² (78% of the CPD territory) has 80 to 94% of the total annual rainfall concentrated in the rainy season, and in 59% of the territory, the concentration is 85 to 94% of the rains in the three or four months. This fact expresses a high concentration of rainfall events in short and long dry periods. The rainfall regime results in a small “window” of climatic conditions, favorable to rainfed agriculture or biomass production.

Embora 21% da região apresente precipitação anual inferior a 600 mm e 0,6% abaixo de 400 mm (Tabela 1, Figura 4), 75% do território encontra-se entre as isoietas de 600 e 1200 mm e 1,7% com total anual superior a 1200 mm. Tal variabilidade espacial das chuvas resulta em distintos microclimas no DFC, variando de deserto na região central a chuvoso na área costeira (Figura 4) e nas montanhas, pelo efeito orográfico. Nessas regiões ($P > 1200$ mm), ocorrem registros da precipitação total anual superior à isoietas de 1800 mm, como é o caso da cidade de Guaramiranga, no estado do Ceará.

Os maiores vazios hídricos do DFC localizam-se entre o litoral Norte do Rio Grande do Norte e a região central do território. O vazio localizado no lado Oeste do território, com direção Norte-Sul (Figura 4), é determinado pelo efeito sota-vento do planalto da Borborema, com presença de massas de ar seca. A grande massa territorial de baixas precipitações encontra-se entre as latitudes 8° S e 11° S. Nessas latitudes, as menores precipitações são determinadas pela baixa influência da ZCIT e das frentes polares na região (Figura 3), ou seja, nem sempre a ZCIT ou a frente polar chegam com massas úmidas o suficiente para gerar precipitações de maiores alturas pluviométricas.

Os eventos de chuva apresentam distribuição unimodal, com elevada concentração em três ou quatro meses do ano (ANDRADE *et al.*, 2017). Em média, 84% da precipitação total anual ocorre durante a estação úmida (Tabela 2). Uma área de 709 km² (78% do território do DFC) apresenta de 80 a 94% das precipitações totais anuais concentradas na quadra chuvosa, e em 59% do território essa concentração é de 85 a 94% das chuvas nos três ou quatro meses de ocorrência de chuvas. Tal fato expressa elevada concentração dos eventos pluviométricos em curto período de tempo e longo período seco. Esse regime pluviométrico resulta em pequena “janela” de condições climáticas favoráveis à agricultura de sequeiro ou produção de biomassa.

Table 2 - Distribution and concentration of rainfall in the rainy season of the Caatinga Phytogeographic Domain (CPD) areas

Tabela 2 - Distribuição, área e concentração das chuvas na estação chuvosa em áreas do Domínio Fitogeográfico da Caatinga (DFC)

Class (%)	Area (km ²)	Area (%)	Concentration (%)
62-73	57.0	6	4
73-80	146.2	16	12
80-85	173.4	19	16
85-88	195.3	21	19
88-91	314.3	34	31
91-94	25.9	3	3
Average	912.2	100	84

Rainfall regime uncertainties are not limited to spatial variability. The regime is also characterized by high interannual (droughts) and interannual (consecutive dry days [CDD] during the rainy season) variabilities. At the same station, total annual rainfall recorded can vary by more than 1000% (Figure 5), as in the stations of Iguatu and Quixadá, in Ceará State. The annual historical series show records of 133 and 280 mm at the Iguatu and Quixadá stations in 1915, respectively. Two years later, in 1917, an accumulated annual rainfall of 1348 and 1405 mm were observed for the same stations, respectively. Such order of magnitude was also registered in 1983 and 1985, when annual rainfall records were 433 mm and 2075 mm for the Iguatu station and 326 mm and 1617 for the Quixadá station, respectively. These findings express the uncertainty of rains in the CPD, even on an annual scale.

An intra-annual variability is present even in regions with total annual rainfall above 1200 mm (ANDRADE *et al.*, 2016); therefore, water vulnerability should not be defined solely on total annual rainfall. Using average values as indicators of the rainfall regime of CPD should be avoided or used with caution (BRASIL *et al.*, 2022). Other indexes should be considered, such as: monthly and annual distribution of events, occurrence of consecutive dry days (CDD), occurrence of “summer” and extreme events (GUERREIRO *et al.*, 2013; CAMPOS; ANDRADE, 2021; GUERREIRO *et al.*, 2021). In short, the local reality consists of uncertainties about the distribution of rainfall both in time and in space.

As incertezas do regime pluviométrico não se limitam à variabilidade espacial; o regime também se caracteriza por elevada variabilidade interanual (existência de secas) e intra-anual (existência de dias secos consecutivos durante a estação chuvosa - DSC). A precipitação total anual registrada em um mesmo posto pode variar em mais de 1000% (Figura 5), caso dos postos de Iguatu e Quixadá, no Ceará. As séries históricas anuais apresentam registros de 133 e 280 mm nos postos de Iguatu e Quixadá no ano de 1915, respectivamente, e, dois anos depois, em 1917, um acumulado de precipitação anual de 1348 e 1405 mm para os mesmos postos, respectivamente. Variabilidade desta magnitude em anos bem próximos, também foi observada nos anos de 1983 e 1985, quando os registros de precipitação anual foram de 433 mm e 2075 mm em Iguatu e de 326 mm e 1617 em Quixadá, respectivamente. Tais resultados expressam a incerteza da precipitação no DFC, mesmo à escala anual.

A variabilidade intra-anual se faz presente mesmo nas regiões com precipitações totais anuais superiores a 1200 mm (ANDRADE *et al.*, 2016), confirmando que não se deve definir a vulnerabilidade hídrica com base, somente, na precipitação total anual - os valores médios como indicadores do regime pluviométrico da DFC devem ser evitados ou usados com cautela (BRASIL *et al.*, 2022). Recomenda-se considerar outros indicadores, como: distribuição mensal e anual dos eventos, ocorrência de Dias Secos Consecutivos (DSC), ocorrência de “veranicos” e eventos extremos (GUERREIRO *et al.*, 2013; CAMPOS; ANDRADE, 2021; GUERREIRO *et al.*, 2021). A grande certeza da realidade local é a incerteza de como os eventos pluviométricos serão distribuídos no tempo e no espaço.

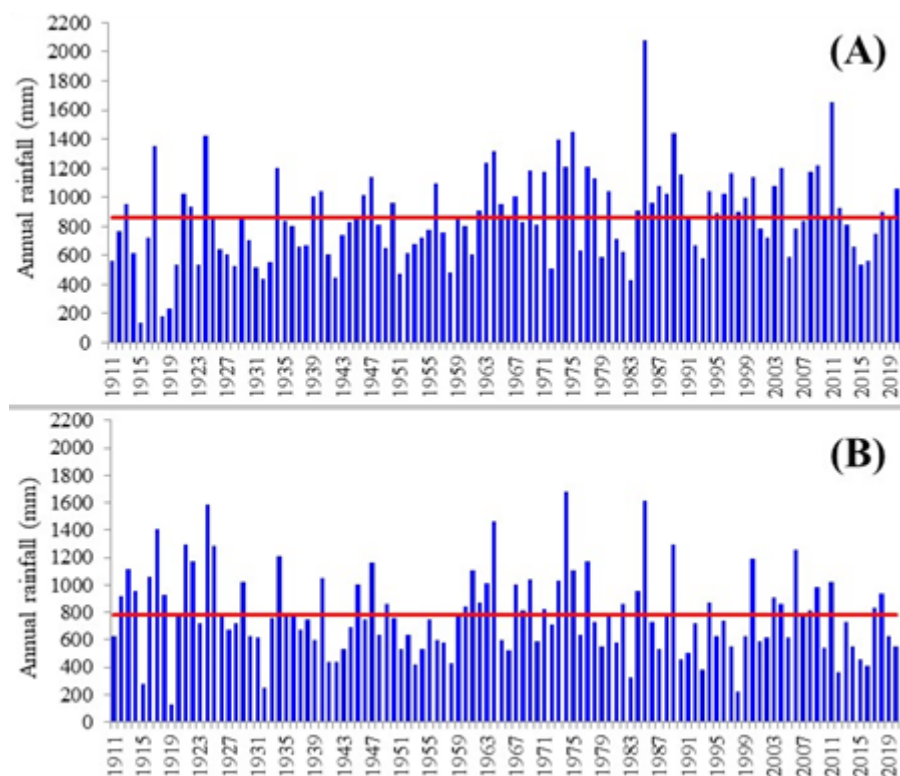


Figure 5 - Annual historical series of the Iguatu (A) and Quixadá (B) stations.

Figura 5 - Série histórica anual dos postos de Iguatu (A) e de Quixadá (B).

Fonte: Autor.

Primary Natural Resources: Solar Radiation

Renewable energy sources have aroused interest worldwide to mitigate environmental impacts from current use of fossil fuels. Thus, solar radiation has been in the world market an alternative for voltaic power production (BYRNE, MBEVA, 2017). Photovoltaic electricity has great potential in Brazil. The Brazilian region with the lowest solar irradiation can generate more solar power than the sunniest lands in Germany (PEREIRA *et al.*, 2017).

Due to its geographic position (2° to 16° S), CPD is characterized by low monthly variability of daily solar irradiation (4.8 to 6.0 Kwh m^{-2}) (Figure 6). Schlecht and Meyer (2012) pointed out that locations with annual solar irradiation availability above 2000 kWh m^{-2} have potential for heliothermic generation. In Brazil, such values are practically limited to the Brazilian semiarid region (MARTINS *et al.*, 2012).

Recursos Naturais Primários: Radiação Solar

As fontes renováveis de energia têm despertado interesse ao nível mundial, com o objetivo de minimizar o impacto ambiental decorrente do uso das atuais fontes de energia fóssil. Assim, a radiação solar participa no mercado mundial como uma alternativa de produção de energia voltaica (BYRNE, MBEVA, 2017). A geração fotovoltaica de energia elétrica tem um grande potencial no Brasil. A região brasileira de menor irradiação solar é capaz de gerar mais eletricidade solar do que o local mais ensolarado da Alemanha (PEREIRA *et al.*, 2017).

Devido à posição geográfica do DFC ($\sim 2^{\circ}$ à 16° S), a região se caracteriza por baixa variabilidade mensal da irradiação solar diária ($4,8$ a $6,0$ Kwh m^{-2}) (Figura 6). Schlecht e Meyer (2012) indicam que locais com disponibilidade de irradiação solar anual maior que 2000 kWh m^{-2} apresentam potencial para geração heliotérmica. No Brasil, tais valores estão limitados, praticamente, ao semiárido brasileiro (MARTINS *et al.*, 2012).

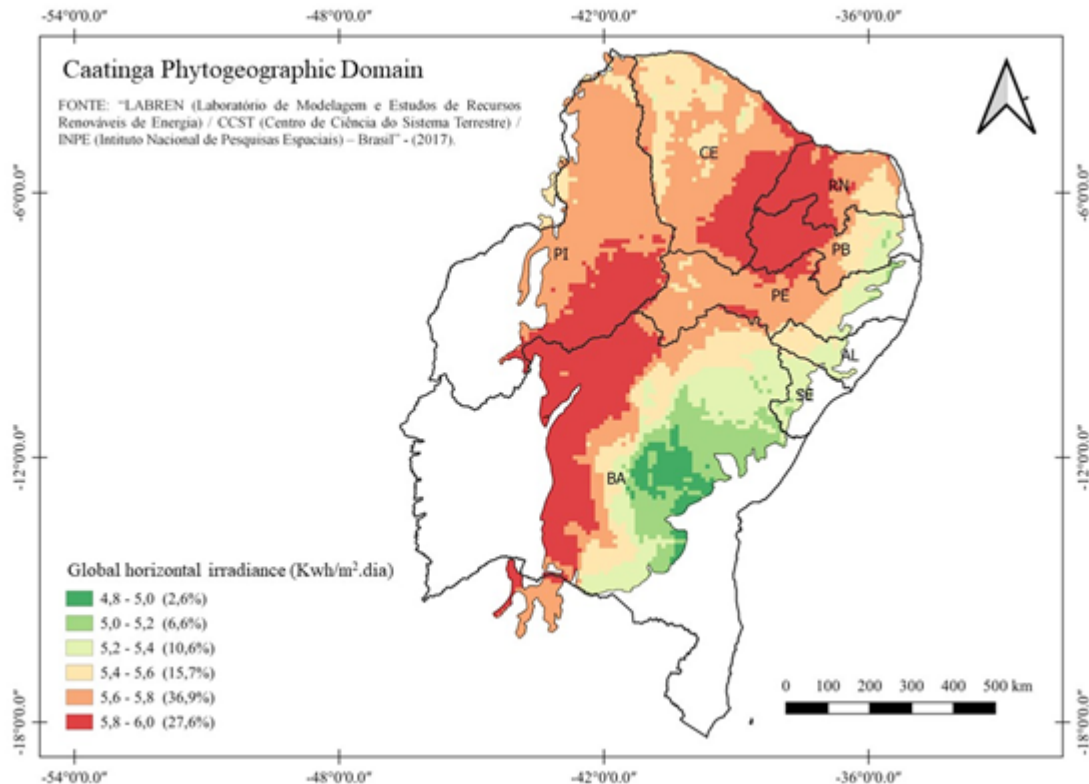


Figure 6 - Annual average Radiation Intensity in the Caatinga Phytogeographic Domain (CPD) areas.

Figura 6 - Intensidade de Radiação média anual em áreas do Domínio Fitogeográfico da Caatinga (DFC).

Fonte: Autor.

The Brazilian semi-arid has been for decades a synonym of drought and qualified as a region of misery, hunger, poverty, and backwardness, where beaches have been considered the only natural resource. The sun was always seen as the “enemy”. Such a paradigm is believed to arise from an economic view, in which goods are produced without considering the aptitude of resources. The socio-economic development of a region must be based on abundant and not on scarce resources.

A sustainable development in the CPD is believed to spread accessibility for photovoltaic power production, thus socializing the local natural wealth. Using solar energy for electricity generation, in addition to breaking the poverty paradigm in the CPD on a small producer scale, can be a tool with high resilience power in the face of global climate change (NOBRE *et al.*, 2019).

O semiárido brasileiro ao longo de décadas foi visto como sinônimo de seca e qualificado como a região da miséria, da fome, da pobreza e do atraso; onde o único recurso natural apresentado eram as praias. O sol era visto, sempre, como o “inimigo”. Acredita-se que tal paradigma seja decorrente de uma visão voltada para um modelo econômico no qual se busca produzir bens sem considerar a aptidão dos recursos. O desenvolvimento socioeconômico de uma região deve se fundamentar em recursos abundantes e não escassos.

Acredita-se que um caminho a seguir para o desenvolvimento sustentável do DFC é promover a difusão de acessibilidade para produção de energia fotovoltaica e, assim, socializa-se a riqueza natural da região. O emprego da energia solar na produção de energia elétrica além de quebrar o paradigma de pobreza do DFC em escala de pequeno produtor, apresenta-se como ferramenta com alto poder de resiliência ante as mudanças climáticas globais (NOBRE *et al.*, 2019).

Solar Energy: rural household sustainability

In the CPD, climate is characterized by high spatial and temporal variability (Figure 5) of rainfall events, with years interspersed between droughts and floods. The model adopted for socioeconomic development was and continues to be agriculture. The lack of harmony between natural resources and results in production and economic profitability uncertainties. This combination culminates in the vulnerability of disadvantaged populations living in rural areas. To mitigate this social vulnerability in the CPD, a model based on abundant natural resources must be adopted.

About 8.6 million people inhabit rural areas in the Brazilian semi-arid region, which is equivalent to 37% of the total population in the region. Of these, 3.65 million have family farming as their main activity, which corresponds to 75.3% of the total involved in the farming sector, higher than the national average of 67% (REIS, 2019). In the Brazilian semiarid region, there are 1.83 million agricultural establishments (IBGE/SIDRA, 2019), which corresponds to 36.2% of the total registered in Brazil (SILVA, *et al.*, 2020). Of this total, 1.44 million (78.8%) are classified as family farming.

In addition to adverse weather conditions, agricultural activities are faced with a land structure in which 64.5% of the farms have less than 10 ha (Table 3). Numbers point to the vulnerability of people who live there, and their constant struggle to produce with scarce resources.

Table 4 depicts the regional vulnerability in numbers. Accordingly, total production revenue was BRL 29,750,619,000, corresponding to an average gross revenue per hectare of only BRL 562.00. Silva *et al.* (2020) showed that agricultural production represents only 39.5% of family income. The remaining 60.5% is distributed as follows: 56.5% from retirement and government programs, and 4% from other sources of income outside the farm. If there were no such pensions and government policies, how could this population survive?

Energia Solar: sustentabilidade das famílias rurais

O clima do DFC é caracterizado pela alta variabilidade espacial e temporal (Figura 5) dos eventos pluviométricos com anos intercalados entre secas e cheias. O modelo adotado para o desenvolvimento socioeconômico da região foi e continua sendo a agropecuária. A falta de consonância entre os recursos naturais e o modelo adotado resulta em incertezas de produção e de rentabilidade econômica. Essa combinação culmina na vulnerabilidade das populações menos favorecidas que habitam a zona rural. A mitigação da vulnerabilidade social das famílias rurais do DFC ocorrerá quando se adotar um modelo fundamentado nos recursos naturais abundantes.

Uma população rural de 8,6 milhões de pessoas habita o semiárido brasileiro, equivale a 37% da população total do semiárido. Deste contingente, 3,65 milhões de pessoas têm como principal atividade a agricultura familiar e corresponde a 75,3% do total de pessoas que desenvolvem atividades no setor agropecuário, sendo superior à média nacional que é de 67% (REIS, 2019). No Semiárido brasileiro há 1,83 milhão de estabelecimentos agropecuários (IBGE/SIDRA, 2019), o que corresponde a 36,2% do total recenseado no Brasil (SILVA, *et al.*, 2020). Desse total, 1,44 milhão (78,8%) são classificados como de agricultura familiar.

Além da adversidade climática para as atividades agropecuárias, depara-se com uma estrutura fundiária na qual 64,5% dos estabelecimentos apresentam área inferior a 10 ha (Tabela 3) Os números apontam para a vulnerabilidade das pessoas que ali vivem e a luta constante para produzir tendo por base recursos escassos.

O retrato dessa condição de vulnerabilidade é quantificado na Tabela 4, em que se observa o Valor Total de produção, R\$ 29.750.619.000, que corresponde ao valor bruto médio por hectare de apenas R\$ 562,00. Silva *et al.* (2020) mostram que a produção agropecuária representa apenas 39,5 da renda familiar. Os outros 60,5% da renda distribui-se da seguinte forma: 56,5% de aposentadoria e programas de governos; e 4% restantes de outras fontes de renda obtidas fora do estabelecimento agrícola. Se não fosse o recurso oriundo das aposentadorias e das políticas governamentais como essa população poderia sobreviver?

Table 3 - Land structure of family farming in the Brazilian semiarid region**Tabela 3** - Estrutura fundiária da agricultura familiar do Semiárido brasileiro

Area class (ha)	Units	%	Area (ha)	%
< 1	218,679	15.4	108,152	0.5
1-5	505,128	35.5	1,154,604	5.3
5-10	193,310	13.6	1,304,354	6.0
10-20	187,374	13.2	2,548,295	11.7
20-50	204,111	14.4	6,179,261	28.3
50-100	76,939	5.4	5,153,470	23.6
100-500	36,721	2.6	5,353,989	24.5
>500	48	0.0	60,797	0.3
Total	1,422,310	100	21,862,922	100

Source: Agriculture Census of 2017 (IBGE/SIDRA, 2019).

Fonte: Censo Agropecuário 2017 (IBGE/SIDRA, 2019).

A way to considerably increase resilience and lessen vulnerability of the population is to add solar energy production to the family's production matrix. Details of this model can be found in Nobre *et al.* (2019). Solar energy is known to be abundant and present throughout the year in the CPD. It has the highest solar radiation intensities in Brazil, with an annual average ranging from 4.8 to 6.0 Kwh m⁻¹ per day (Figure 6). A large part of the CPD (97.4%) has an average annual radiation intensity between 5.0 and 6.0 Kwh m⁻² per day, that is, families can generate it in almost the entire area.

Uma forma de ampliar consideravelmente a resiliência e reduzir a vulnerabilidade dessa população é adicionar a produção de energia solar na matriz produtiva das famílias. Detalhes desse modelo podem ser encontrados em Nobre *et al.* (2019). Sabe-se que a disponibilidade de energia solar no DFC é abundante e presente o ano inteiro. A região apresenta as maiores intensidades de radiação solar do Brasil com média anual variando de 4,8 a 6,0 Kwh m⁻¹ por dia (Figura 6). Grande parte do DFC (97,4%) apresenta intensidade de radiação média anual entre 5,0 e 6,0 Kwh m⁻² por dia, ou seja, em quase a totalidade do território do DFC é possível ter famílias produtoras de energia.

Table 4 - Total gross revenue (TGR)¹ and gross revenue per hectare (GRH)² of agriculture and livestock**Tabela 4** - Valor Total Bruto (VTB)¹ e Valor Bruto por Hectare (VBH)² da agropecuária

Category	Area (ha)	%	¹ TGR (BRL 1.00)	%	² Mean GRH (BRL 1.00)
Family	21,862,922	41.3	11,574,081,000	38.9	529
Non-family	31,080,298	58.7	18,176,538,000	61.1	585
Total	52,943,220	100.0	29,750,619,000	100.0	562

Source: Agriculture Census of 2017 (42).

¹Total gross revenue. Only the major crops were considered (cashew nut, cassava, black-eyed peas, umbú, corn, pumpkin, sweet potato, paddy, watermelon, and forage palm) and the animals with the highest number of heads (bovine, sheep, goat, swine, and poultry); ²Gross revenue per hectare = TGR/area

Fonte: Censo Agropecuário 2017 (IBGE/SIDRA, 2019).

¹Valor Total de Bruto. Foi considerado as culturas de maior abrangência (castanha de caju, mandioca, feijão fradinho, umbú, milho, jerimum, bata doce, arroz em casca, melancia e palma forrageira) e os animais com maior número de cabeça (bovino, ovino, caprino, suíno e aves); ²Valor Bruto por Hectare = VTB/área.

However, to explore solar radiation as a source of income, local residents, which are historically known for living below the poverty line, will require the Brazilian legislation on power transmission and production control to be changed. This would overcome hurdles to use this natural resource as a source of economic capital. In this sense, subsidies offered by the government to rural producing families in the CPD could be redirected to support the installation of photovoltaic micro-power plants, promoting socioeconomic development in the region. Payment system used to pay small producers for power produced could be based on that made in oil exploration, that is, through royalties (NOBRE *et al.*, 2019).

Technological state-of-the-art

In the current context, two technologies of long-range diffusion consist of photovoltaic solar modules (monocrystalline and polycrystalline). Monocrystalline cell modules have higher energy conversion efficiency than polycrystalline cell ones. According to the manufacturer, Jinko Salar, polycrystalline cells have a conversion efficiency of up to 17.20%, while monocrystalline modules have a conversion efficiency of 21.13%. Since power generation is continuous, and both modules give a 30-year production guarantee, such differences in energy production efficiency contribute economically to producers.

Technological novelties in monocrystalline modules still continue to emerge, and bifacial monocrystalline modules already exist. Bifacial monocrystalline modules, in addition to direct solar irradiation, also use incident solar radiation albedo (reflection). With this innovation, technology can reach efficiency of 26.42%, according to the manufacturer, Jinko Solar. Tab5 shows monthly, annual, and 30-year (factory warranty) estimates of energy production and revenue generated by monofacial solar module and bifacial solar module using Equation 1. The economic evolution of power generation was analyzed using an average kWh rate of Group-B energy bills by the power utility in the state of Ceará. Inflation developments on electricity tariff was disregarded.

No entanto, para explorar o recurso natural radiação solar como fonte de renda, para uma população historicamente conhecida por viver abaixo da linha de pobreza, é necessário que a legislação brasileira de regulação de transmissão e produção de energia seja alterada, e assim, eliminar-se o entrave ao uso do recurso natural, energia solar, como fonte de capital econômico. Entende-se que o subsídio ofertado pelo governo às famílias produtoras rurais do DFC poderia ser reencaminhado na forma de instalação de micro usinas produtoras de energia fotovoltaica e, assim, promover, efetivamente, o desenvolvimento socioeconômico da região. O pagamento pela geração de energia aos pequenos produtores de energia poderá se basear na experiência com exploração do petróleo, por meio de “royalties” (NOBRE *et al.*, 2019).

Estado da arte tecnológico

No contexto atual, há duas tecnologias com grande difusão de módulos solares fotovoltaicos - módulos monocristalinos e policristalinos. Os módulos solares com células monocristalinas têm maior eficiência de conversão de energia em relação aos de células policristalinas. Segundo o fabricante, Jinko Salar, as células policristalinas apresentam eficiência de conversão de até 17,20%, enquanto os módulos monocristalinos apresentam eficiência de conversão de 21,13%. Essa característica é importante porque sendo a produção de energia contínua, e apresentando os novos módulos uma garantia de 30 anos de produção, a diferença de eficiência de produção de energia contribui significativamente para o nível econômico.

No entanto, as novidades tecnológicas dos módulos monocristalinos continuam a surgir - já existem módulos monocristalinos bifaciais. Os módulos monocristalinos bifaciais, além da irradiação solar direta também utilizam o albedo (reflexão) da radiação solar incidente. Com essa inovação tecnológica podem chegar a uma eficiência de 26,42%, de acordo com o fabricante, Jinko Solar. Estimou-se a potencialidade da produção de energia e receita gerada por módulo solar monofacial e por módulo solar bifacial, mensalmente, anualmente e durante a garantia de fábrica dos módulos (30 anos) pela Equação 1 (Tabela 5). Para demonstrar a evolução econômica da produção de energia, adotou-se a tarifa média do kWh das contas de energia do grupo B da concessionária de energia do estado do Ceará. Não foi considerado a evolução da inflação sobre a tarifa de energia.

$$PG = P_{\max} * FSH * EL \quad \text{Eq. 1}$$

Wherein:

PG. Power generation (kWh); P_{\max} . Power at maximum output (kW); FSH. Full sun hours (h); EL. Environmental losses, factor 0.754.

The price of a 530-Wp monocrystalline bifacial module in Brazil is about BRL 1,140.00 (market value in 2022). Annual power generation per bifacial module, without incurring inflation, cost BRL 914.29 (Table 5).

Onde:

PE - Produção de Energia (kWh); P_{\max} - Potência Modulo em Máxima Potência (kW); HSP - Horas de Sol Pleno (h); PA – Perdas Ambientais, fator de 0,754.

O preço de um módulo bifacial monocrystalino de 530 Wp, no Brasil, é de aproximadamente R\$1.140,00 (valor de mercado em 2022). Verificou-se que o valor de produção de energia anual pelo módulo bifacial, sem utilizar a inflação sobre a energia elétrica, é de R\$914,29 (Tabela 5).

Table 5 - Evolution of power generation and value for mono- and bifacial solar modules during the factory warranty period

Tabela 5 - Evolução de produção e valor de energia de modulo solar mono e bifacial no período de garantia de fábrica

Module type	PGD (kWh)	Value (BRL)	PGM (kWh)	Value (BRL)	PGY (kWh)	Value (BRL)	PG30Y (kWh)	Val (BRL)
Monofacial	2.33	1.98	69.76	59.30	837.14	711.57	25114.10	21347.00
Bifacial	2.99	2.54	89.64	76.19	1075.64	914.29	32269.19	27429.00

PGD – power generated in one day; PGM – power generated in one month; PGY – power generated in one year; PG30Y – power generated during the factory warranty period for the modules; Value – Energy monetary value in BRL.

EPD – Energia produzida em 1 dia; EPM – Energia produzida em um mês; EPA – Energia produzida em 1 ano; EP30A – Energia produzida pelo tempo de garantia dos módulos; Val – Valor em reais da energia.

Hence, after two years, the amount invested in the system can be amortized, with a surplus of BRL 340.00. Therefore, return on investment can be achieved in 22 months if power cost is corrected by 10% per year. As a result, it is recommended for the government redirects subsidies provided to families to support installation of photovoltaic micro-plants.

Poverty and destitution of farming households in the semi-arid region can be reduced using power generation in two ways: a) generation of a new low-uncertainty income source; and b) cost reduction with energy tariffs. For a better understanding of how this can proceed, here follows two examples:

Assim, após dois anos de funcionamento do sistema, o valor de investimento do módulo solar fotovoltaico foi amortizado, havendo um superavit de R\$340,00, ou seja, o retorno do investimento é alcançando em 22 meses, caso a correção do custo da energia elétrica seja de 10% ao ano. O Governo poderia redirecionar os recursos ofertados como subsídios às famílias na forma de instalação de micro usinas produtoras de energia fotovoltaica.

A redução da miséria e da pobreza das famílias rurais do semiárido através da produção de energia pode ocorrer de duas formas: a) geração de nova fonte de renda de baixa incerteza; e b) redução de custos com as tarifas de energia. Para um melhor entendimento de como se pode ocorrer, apresenta-se dois exemplos, como se segue:

Solar energy generation in one hectare in the semiarid region

Assumptions: production measuring unit will be the hectare since it is usually used in the agricultural sector; the caatinga vegetation must not be removed to install panels, which should be made in degraded areas already existing on the farm. Based on the predominant land structure in the region (Table 3), where 51% of the establishments have an area below 5ha, calculations were made for four different areas (200, 500, 1000, and 10000 m²).

When installing the systems, monocrystalline bifacial modules and the entire connection structure to the local utility network are used. The photovoltaic module used has a power of 530 Wp when an irradiation power of 1000 W m⁻² is applied to the panel, in addition to this irradiation power, sunlight reflection (albedo) is also used. This photovoltaic solar module can be considered with a maximum peak power of 663 Wp. In this case, a 1-MW substation is required.

Equation 1 was used to quantify power and revenue generated in the four areas (Table 6). For calculations, 5.84 kWh m⁻² was considered for full sun hours (FSH), equivalent factor of ambient losses (AP) of 0.754, and a production factor of 0.25. As in Brazil there is no legislation for sale of energy as an individual, the production factor used in Portugal was adopted, updating Table 6 to (BRL), in case the sale of energy occurs or even consumption by a consumer unit at the power generation tariff post.

Once decision makers legitimize the potential of solar energy as a socioeconomic development promoter for rural families in the Brazilian semiarid region, shifting from scarcity to abundance (Table 6). After changing the legislation, the families will receive an annual income of BRL 517,800.00 per hectare, that is, a monthly income of BRL 43,150.00. After all, such capital injection would heat up the market and create new jobs.

Produção de energia solar de 1 hectare no semiárido

Premissas: a unidade de produtividade agropecuária será o hectare, visto que se trata de uma unidade habitualmente usada no setor agropecuário; a vegetação da caatinga não deve ser retirada para instalação dos painéis, que devem ser instalados nas áreas degradadas já existentes na propriedade. Tomando-se por base a estrutura fundiária predominante na região (Tabela 3), onde 51% dos estabelecimentos têm área inferior a 5 hectares, efetuou-se os cálculos para quatro áreas distintas (200; 500; 1000 e 10000 m²).

Na instalação dos sistemas, usa-se módulos bifaciais monocristalinos e toda a estrutura de conexão à rede da concessionária local. O módulo fotovoltaico utilizado tem potência de 530 Wp quando incide sobre a placa uma potência de irradiação de 1000 W m⁻², para além dessa potência de irradiação, a reflexão da luz solar (albedo) também é utilizada. Esse módulo solar fotovoltaico pode ser considerado com uma potência de pico máximo de 663 Wp. Neste caso, é necessária uma subestação de 1 MW.

Para quantificar a produção de energia e a receita gerada nas quatro áreas (Tabela 6) empregou-se a Equação 1. Na elaboração dos cálculos, considerou-se 5,84 kWh m⁻² para as horas de sol pleno (HSP) equivalente, fator de perdas ambientes (PA) de 0,754 e um fator de produção de 0,25. Uma vez que o Brasil ainda não dispõe de legislação para venda de energia na condição de pessoa física, adotou-se o fator de produção empregado em Portugal, atualizando a Tabela 6 para (R\$), caso ocorra a venda de energia ou mesmo o consumo por uma unidade consumidora no posto tarifário de produção de energia.

Quando os tomadores de decisão legitimarem o potencial da venda de energia solar para o desenvolvimento socioeconômico das famílias rurais do semiárido brasileiro, pode-se sair da condição de escassez para a condição de abundância (Tabela 6). Caso a legislação seja alterada, uma família poderá obter uma renda anual de R\$517.800,00 por hectare, ou seja, uma renda mensal de R\$43.150,00. Todo esse capital traria o aquecimento do mercado e geração de empregos.

Table 6 - Gross revenue generated from land use and installed area with photovoltaic (PV) modules**Tabela 6** - Receita bruta gerada em função do uso da terra e da área instalada com módulos FV

Land use	Area (m ²)	TM ²	Power Generation (MWh)	Annual Revenue (BRL)
Agro-livestock ¹	10.000		-	562.00 ³
	200	67	66.72	16,680.00
Solar energy	500	167	166.32	41,580.00
	1,000	333	331.68	82,920.00
	10,000	2,080	2,071.20	517,800.00

¹Source: Censo Agropecuário, 2017 (IBGE/SIDRA, 2017) nly the major crops were considered (cashew nut, cassava, black-eyed peas, umbú, corn, pumpkin, sweet potato, paddy, watermelon, and forage palm) and the animals with the most headcount were considered (bovine, sheep, goat, swine, and poultry); ² TM – Module Size; ³See Table 4.

¹ Fonte: Censo Agropecuário 2017 (IBGE/SIDRA, 2019). Foi considerado as culturas de maior abrangência (castanha de caju, mandioca, feijão fradinho, umbú, milho, jerimum, bata doce, arroz em casca, melancia, palma forrageira) e os animais com maior número de cabeça (bovino, ovino, caprino, suíno e aves); ² TM – Tamanho do módulo; ³ver Tabela 4.

a) Technical-financial feasibility of a micro-power system for the semiarid region

Due to the land structure in the Brazilian semiarid, solar energy can be used as a power source for agricultural production. Such an action will reduce the expenses of farmers, increasing their net income.

For instance, according to Vidal *et al.* (2005), average monthly electricity value for one hectare of irrigated rotational grazing system for sheep fattening in 2005 was BRL 685.97. By reverse engineering and using the costs in kWh presented by Borges (2021), an average value of power required for rotational grazing per hectare reached 1500 kWh; this energy presented in kWh represents a monetary value of BRL 1,275.00.

To simulate the technical-financial proposal for a rotational grazing with an average power consumption of 1500 kWh, a system of 17 monocrystalline bifacial modules is needed. Comparing the energy bill of production using the proposed kit (Figure 7), one can identify that the power produced within nine months by the system is greater than or equal to its consumption.

b) Proposta técnico financeira de viabilidade de microssistema no semiárido

Devido à estrutura fundiária do semiárido brasileiro, a energia solar pode ser utilizada como fonte de energia para a produção agropecuária. Tal ação reduzirá as despesas do produtor rural, o que implica em ampliação de sua renda líquida.

Para exemplificar a viabilidade, usou-se as informações apresentadas por Vidal *et al.*, (2005). Segundo estes autores, o valor mensal da energia elétrica para o sistema produtivo de um hectare de pastejo rotacionado irrigado de engorda de ovinos em 2005 era de R\$ 685,97. Por engenharia reversa, e utilizando os custos do kWh apresentados por Borges (2021), pode-se chegar ao valor médio de energia necessário para pastejo rotacionado de 1500 kWh por hectare. Esta energia apresentada em kWh representa um valor monetário de R\$1.275,00.

Para a simulação da proposta técnico-financeira de consumo médio de energia elétrica para o pastejo rotacionado de 1500 kWh, é necessário um sistema de 17 módulos bifaciais monocristalinos. Comparando-se uma conta de energia do consumo com a produção do kit proposto (Figura 7), identifica-se que em nove meses do ano a energia elétrica produzida pelo sistema é maior ou igual ao consumo.

However, power generation is lower than consumption only between April and June, which occurs due to a high cloudiness. It can be offset by the power production during the months with higher solar radiation and albedo values. This grid-connected solar system has an average total cost of BRL 46,800.00. By contrast, if 530-Wp monocrystalline monofacial modules are used, production will be lower (Figure 7), which will demand a greater number of modules to provide the same amount of power.

After the second year of use for rotational grazing, the difference between cost and revenue per hectare is BRL 538.82, making the system unfeasible. When a grid-connected photovoltaic system is adopted, the economic return is BRL 1,275.00. The difference between the two revenues is BRL 736.18, making the production system in question economically viable. In this system, a large part of the fixed cost is labor, which may present greater viability in a family farming system. It is noteworthy that, after 30 years of operation, the proposed system will save 304,765 trees and mitigate 548.6 tons of carbon emissions.

Apenas nos meses de abril, maio e junho a produção é menor, devido à elevada nebulosidade nesses meses do ano. No entanto, esses valores de produção de energia elétrica menor que o consumo, são compensados pela produção nos meses com maior irradiação e albedo. O custo total desse sistema solar conectado à rede é, em média, de R\$ 46.800,00. Caso os módulos monofaciais monocristalinos de 530 Wp sejam os utilizados, a produção é menor (Figura 7), sendo necessário uma maior quantidade de módulos para disponibilizar a mesma quantidade de energia.

A diferença entre Custo e Receita a partir do segundo ano de tratamento específico do pastejo rotacionado fica em R\$ 538,82, inviabilizando o sistema para 1 hectare. Quando é adotado o sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica, tem-se um retorno econômico de R\$ 1.275,00. A diferença entre as duas receitas é de R\$ 736,18, viabilizando economicamente o sistema produtivo em questão. Nesse sistema, grande parte do custo fixo é mão de obra, e poderia apresentar maior viabilidade num sistema produtivo familiar. Destaca-se que o sistema proposto em 30 anos de operação, permitirá salvar 304.765 árvores e mitigar 548,6 toneladas de carbono.

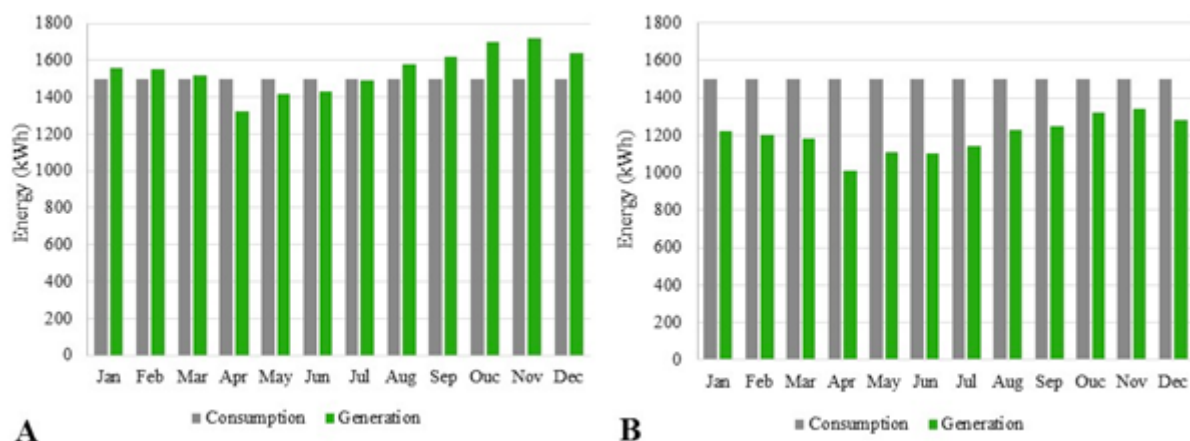


Figure 7 - Power generation by bifacial modules (A), monofacial modules (B), and annual energy consumption per hectare in a rotational grazing system.

Figura 7 - Produção de energia de módulos bifaciais (A), módulos monofaciais (B) e consumo anual por hectare de pastejo rotacionado.

Secondary Natural Resources

The CPD region is on Precambrian crystalline rocks (gneisses, granites, and schists), which represent the major geological units in the east-Northeast, except for sedimentary basins in the coastline (SAADI, 1993) and west-Northeast. The CPD is geologically constituted by about 70% metamorphic and igneous rocks and 30% sedimentary rocks (MORO *et al.*, 2016). The sedimentary formation predominates in the western, while the crystalline one in the eastern.

The landscape of northeastern Brazil evolved from an exposure of pediment ramps to climatic changes in the Quaternary, while the *Pediplanos Sertanejos* (Hinterland Pediplans) resulted from a broad and slow erosion under very humid conditions, followed by intense aridity (MAIA *et al.*, 2010). A proof of existence of high rainfall and surface runoff periods in ancient times in the Brazilian semi-arid is the presence of pebbles in the terrain and interfluvies of river springs (MAIA *et al.*, 2010). This process began in the Lower Tertiary and was followed by more modern pediplanation phases, contemporaneous with the deposition of the Barreiras Group. Isolated traces of younger surfaces are found in the CPD environment, which are characterized by plateaus, mountain ranges, and inselbergs.

Geological and climatic processes over geological eras, together with the action of organisms, gave rise to soils in the CPD. These interactions resulted in a high diversity of soil types, thus forming a true mosaic where soil classes can vary over small distances. Of the 13 soil classes found in the Brazilian territory, 10 are found in the CPD (Figure 8).

CPD soils are generally shallow and have low permeability and organic matter content. Throughout the year, they are exposed to excess heat and light, which accelerates mineralization of organic matter. Their fertility is based on alkalinity and base richness (ARAÚJO FILHO, 2013). Therefore, these soils must be exploited based on ecohydrology principles (ANDRADE *et al.*, 2020) to preserve or increase organic matter contents. Although these soils are complex and have varied characteristics (EMBRAPA SOLOS, 2020), 90% are contained in five classes, namely: Neosols, Latosols, Ultisols, Luvisols, and Planosols. (Figure 8), with Neosols, Latosols, and Ultisols corresponding to 62.4%.

Recursos Naturais Secundários: Solos

A região do DFC encontra-se sobre rochas cristalinas do Pré-Cambriano (gnaiesses, granitos e xistos), as quais representam as grandes unidades geológicas predominantes no Nordeste oriental, com exceção das bacias sedimentares localizadas na faixa litorânea (SAADI, 1993) e parte ocidental do Nordeste. O DFC é constituído em sua base geológica por aproximadamente 70% de rochas metamórficas e ígneas e 30% de rochas sedimentares (MORO *et al.*, 2016). A formação sedimentar predomina na região Oeste e a cristalina, na região mais a Leste.

A evolução da paisagem nordestina se fundamenta no fato de que rampas de pedimentação foram submetidas a mudanças climáticas no Quaternário, sendo os *Pediplanos Sertanejos* resultantes de um vasto e lento processo erosivo em condições muito úmidas, seguidas de intensa aridez (MAIA *et al.*, 2010). Uma comprovação da existência de um período de elevadas precipitações e escoamento superficial em épocas pretéritas na região do semiárido brasileiro é a presença de seixos rolados nos terrenos e interflúvios das nascentes fluviais (MAIA *et al.*, 2010). Tal processo teve início no Terciário Inferior, sendo seguido por fases de pediplanação mais modernas, contemporâneas à deposição do Grupo Barreiras. Vestígios isolados de superfícies mais jovens são encontrados no ambiente do DFC, os quais se caracterizam pelas chapadas, serras e *inselberges*.

Os processos geológicos e climáticos ocorridos ao longo das eras geológicas, juntamente com a ação dos organismos, deram origem aos solos do DFC. A ação dessas interações sobre a região resultou em elevada diversidade de tipos de solo formando um verdadeiro “mosaico”, em que classes de solo podem variar em pequenas distâncias. Das 13 classes de solos encontradas no território brasileiro, 10 se fazem presentes no DFC (Figura 8).

Os solos são, em geral, pouco profundos com baixa permeabilidade e teor de matéria orgânica. Recebem anualmente excesso de calor e luz, o que resulta em rápida mineralização da matéria orgânica. A fertilidade se baseia na alcalinidade e riqueza em bases (ARAÚJO FILHO, 2013). Portanto, o uso desses solos deveria se fundamentar nos princípios da ecohidrologia (ANDRADE *et al.*, 2020), a fim de preservar ou aumentar a matéria orgânica do solo. Embora os solos do DFC sejam complexos com características variadas (EMBRAPA SOLOS, 2020), 90% estão contidos em cinco classes de solos - Neossolos, Latossolos, Argissolos, Luvisolos e Planossolos. (Figura 8). As classes Neossolos, Latossolos e Argissolos correspondem a 62,4% dos solos na região.

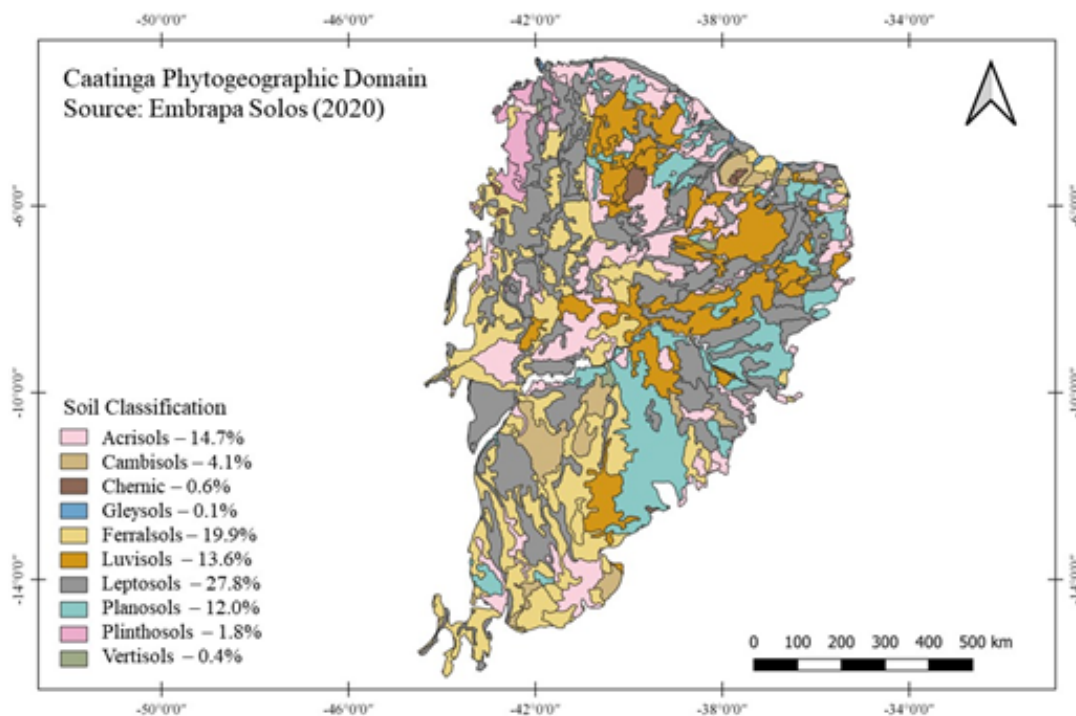


Figure 8 - Geographical distribution of the main soil classes in the Caatinga Phytogeographic Domain (CPD) areas.

Figura 8 - Distribuição territorial das principais classes de solos em áreas do Domínio Fitogeográfico da Caatinga (DFC).

Neosols are subdivided into: Fluvic Neosols, Quartzarenic Neosols, Regolithic Neosols, and Litholic Neosols. The latter is the most abundant in the CPD. Neosols are soils usually associated with rocky outcrops and often have abundant stony and rocky terrains (ROMERO; FERREIRA, 2016). They are unsuitable for agriculture as their shallow depth restricts root development and water-storage capacity. This small thickness, associated with predominant relief conditions (heavily undulating), favors erosion, hence discouraging mechanization.

Latosols are characterized by a small texture gradient throughout their profile, from sandy to medium texture, excessively drained. They represent the second most common class in the CPD, accounting for about 20% of the region (171,500 km²).

A classe dos Neossolos é subdividida em: Neossolos Flúvicos, Neossolos Quartzarênicos, Neossolos Regolíticos e Neossolos Litólicos, esta última, a mais abrangente no DFC, dentre os Neossolos. São solos geralmente, associados a afloramentos rochosos e apresentam muitas vezes pedregosidade abundante e rochosidade no terreno (ROMERO; FERREIRA, 2016). Esses solos são impróprios para agricultura, pois sua profundidade limitada restringe o desenvolvimento do sistema radicular, além da sua baixa capacidade de armazenamento de água. A pequena espessura associada às condições predominantes de relevo (fortemente ondulado), favorecem a erosão, não sendo recomendado o emprego da mecanização.

Os Latossolos se caracterizam por um pequeno gradiente textural ao longo do perfil, textura arenosa a média, excessivamente drenados. Representam a segunda classe mais comum no DFC, aproximadamente 20% da região (171,5 mil km²).

Most of the Latosols are in the South and Southwest regions of the CPD, which corresponds to Bahia State and the southern Piauí State. Latosols are distributed in the wide plateaus, in areas of flat to gently undulating relief. When under natural conditions, these soils are acidic, with high exchangeable aluminum content and low natural fertility, which can be corrected by liming and fertilization management. Thus, a proper management can increase organic matter content, cation exchange capacity, and physical protection. Latosols are deep with high friability, porosity, and internal drainage (SANTOS *et al.*, 2018). The suitable physical properties of this soil class allow mechanization, preferably no-tillage system or minimal cultivation and irrigation.

Ultisol is the third most extensive class, occupying around 15% of the CPD. It has a textural B horizon immediately below the A or E, and low- or high-activity clay. This trait, when combined with low base saturation or aluminum character in most of the B horizon, also satisfies the following requirements: Plinthic horizon, if present, does not meet the criteria for Plinthosols; and glei horizon, if present, does not meet the criteria for Gleysols (SANTOS *et al.*, 2018).

Unlike Latosols, Ultisols have wide variability in terms of chemical, physical-chemical, mineralogical, and physical properties. Their colors can be yellow, red-yellow, red, or grayish; their textures vary from sandy to clayey on the surface, and from medium to very clayey on the subsurface; their depths range from shallow to very deep; drainage, from imperfectly to heavily drained; cation exchange capacity (CEC), from low to high, among others. Some of these soils may have agricultural limitations due to small effective depth, stoniness, rockiness, relief, drainage, and low natural fertility (ARAÚJO FILHO, 2013). Moreover, the depth of textural B horizon increases soil susceptibility to erosion (ROMERO, FERREIRA, 2016).

Luvissols stand out for being the fourth most abundant class in the CPD, occupying about 117,400 km², which represents 13% of the area. This class comprises non-hydromorphic mineral soils, where textural diagnostic horizon B develops expressively, in addition to high clay activity and high base saturation, immediately below the A horizon or E horizon (SANTOS *et al.*, 2018).

Os Latossolos, em sua maioria, estão localizados na parte Sul e Sudoeste do território do DFC, o que corresponde ao estado da Bahia e região Sul do estado do Piauí. Os Latossolos se distribuem nos amplos chapadões, em áreas de relevo plano a suavemente ondulado. Quando em condições naturais são ácidos, com elevado teor de alumínio trocável e baixa fertilidade natural, que pode ser corrigida pelo manejo da calagem e da adubação. O manejo adequado vai favorecer o aumento do teor de matéria orgânica, da capacidade de troca catiônica e proteção física nele. Os Latossolos são profundos com boa friabilidade, porosidade e drenagem interna (SANTOS *et al.*, 2018). As boas propriedades físicas dessa classe de solo possibilitam a mecanização, preferencialmente, empregando sistema de plantio direto ou cultivo mínimo e a prática de irrigação.

A classe dos Argissolos é a terceira em abrangência no DFC, ocupando, aproximadamente, 15% do território. Apresenta horizonte B textural imediatamente abaixo do A ou E, com argila de atividade baixa ou argila de atividade alta, desde que conjugada com saturação por bases baixa ou com caráter alumínico na maior parte do horizonte B, satisfazendo ainda aos seguintes requisitos: Horizonte plíntico, se presente, não satisfaz aos critérios para Plintossolos e Horizonte glei, se presente, não satisfaz aos critérios para Gleissolos (SANTOS *et al.*, 2018).

Ao contrário dos Latossolos, essa classe tem variabilidade ampla quanto as características químicas, físico-químicas, mineralógicas e propriedades físicas. A cor pode ser amarela, vermelho-amarela, vermelha ou acinzentada; a textura varia de arenosa a argilosa na superfície e de média a muito argilosa em sub superfície; a profundidade, varia de rasa até muito profunda; a drenagem, desde imperfeita até acentuadamente drenada; a CTC, de baixa a alta, entre outras. Alguns desses solos podem ter limitações agrícolas devido a pequena profundidade efetiva, pedregosidade, rochosidade, relevo, drenagem e fertilidade natural baixa (ARAÚJO FILHO, 2013). A profundidade do horizonte B textural aumenta a susceptibilidade destes solos ao processo erosivo (ROMERO, FERREIRA, 2016).

A classe dos Luvissolos se destaca por ser a quarta mais abundante no DFC, ocupando aproximadamente 117,4 mil km², o que representa 13% da área de abrangência do bioma. Essa classe compreende solos minerais não hidromórficos, nos quais ocorre desenvolvimento expressivo do horizonte diagnóstico B textural, aliado à alta atividade de argilas e alta saturação por bases, imediatamente abaixo de horizonte A ou horizonte E (SANTOS *et al.*, 2018).

Planosols correspond to 12% of the CPD surface, with soils typical of low, flat or gently undulating regions; very common in the *Depressão Sertaneja* (Hinterland Depression). Although most of them have fair to good natural fertility conditions, they have strong limitations for agricultural use, mainly due to high concentrations of exchangeable sodium, which accumulate at subsurface horizons (ROMERO, FERREIRA, 2016). Such characteristics can cause water stress in plants and nutritional imbalance, in addition to poor physical conditions that hinder water drainage and root development, facilitating erosion.

Argisols, Litholic Neosols, and Luvisols are more concentrated in the northeast of the CPD, corresponding to the states of Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, and Pernambuco. These poorly developed, shallow, and eutrophic soils are dominant in the region due to its dry tropical climate. However, high local soil diversity has been attributed to variation in lithology and/or relief distribution. Thus, understanding soil diversity is relevant, because plant distribution is conditioned to their characteristics and properties (RODRIGUES *et al.*, 2018). Soils are conditioned by climatic weathering, which in turn influences ecosystem phytophysionomies.

Over time, soil in the CPD has always been explored by direct application of practices suitable for temperate climates. Among these techniques is removal of native vegetation for farming, which demand more from the soil than its bearing capacity. Added to this pressure is the use of fire, which reduces the little organic matter present therein. This unfortunate combination resulted in nomadic agriculture, degrading soil and vegetation (ARAÚJO FILHO, 2013, DUQUE, 1980). Today, there is some areas under degradation process, losses in fauna and flora biodiversity, intense erosion processes that silt rivers and reservoirs, contaminated water bodies and, consequently, compromised quality of life.

Os Planossolos correspondem a 12% da superfície do DFC, com solos típicos de regiões baixas, planas ou suavemente onduladas; muito frequente na Depressão Sertaneja. Embora possuam, na sua maioria, condições de fertilidade natural de razoáveis a boas, são solos que apresentam fortes limitações ao uso agrícola em decorrência, principalmente, das altas concentrações de sódio trocável, que se acumulam nos horizontes subsuperficiais (ROMERO, FERREIRA, 2016). Tais características podem causar estresse hídrico nas plantas e desbalanço nutricional, além de más condições físicas que dificultam a drenagem da água e o desenvolvimento radicular, facilitando o processo erosivo do solo.

As maiores concentrações dos Argissolos, Neossolos Litólicos e os Luvisolos encontram-se na região Nordeste do DFC, correspondendo aos estados do Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba e Pernambuco. Solos pouco desenvolvidos, rasos e eutróficos são dominantes na região devido ao clima tropical seco. No entanto, a alta diversidade local de solos tem sido atribuída à variação da litologia e/ou distribuição do relevo. Compreender a diversidade do solo é relevante, considerando que a distribuição das plantas é condicionada pelas suas características e propriedades (RODRIGUES *et al.*, 2018). O solo é condicionado pelo intemperismo climático, que por sua vez influencia as fitofisionomias do ecossistema.

Ao longo do tempo, a exploração do solo no DFC sempre foi realizada com a aplicação direta de técnicas e práticas próprias para solos de clima temperado. Entre essas técnicas cita-se a retirada da vegetação nativa para a implantação de lavouras que demandam do solo mais do que a sua capacidade de suporte. Adicione-se a essa pressão o uso do fogo, que queima a pouca matéria orgânica ali existente. Essa infeliz combinação resultou em uma agricultura nômade e degradante do solo e da vegetação (ARAÚJO FILHO, 2013, DUQUE, 1980). Hoje, existe um quadro de áreas em processo de degradação, perdas na biodiversidade da fauna e flora, processos erosivos intensos que resultam em assoreamento de rios e reservatórios, corpos hídricos contaminados e, conseqüentemente, comprometimento da qualidade de vida.

Secondary Natural Resources

The different vegetation typologies in the CPD arise from an arrangement between soil types and rainfall regime in the region (NERI *et al.*, 2012). Among these typologies, tropical dry forest is predominant. The CPD has a high diversity of plant species, with about 3150 species, of which more than 725 (23%) are endemic (QUEIROZ *et al.*, 2017). The main environmental characteristics that determine this diversity are: high daily solar energy availability, from 4.8 to 6.0 kWh m⁻² (PEREIRA *et al.*, 2017); rainfall variability and high potential evaporation rates, from 1500 mm year⁻¹ (coastal regions) to 3000 in the continental area (MOLLE, 1989).

Caatinga vegetation consists mainly of woody and herbaceous endemic species. The woody stratum comprises small, endowed with thorns, and usually deciduous plants. It is a vegetation rich in species of cactus and bromeliads (NERI *et al.*, 2012; RODRIGUES *et al.*, 2018). Phytosociologically, species density, frequency, and dominance are determined by topographic variations, soil type, and rainfall (MORO *et al.*, 2016). The most abundant species in the caatinga belong to the families of legumes (*Caesalpinaceae*, *Mimosaceae*, and *Fabaceae*), *Euphorbiaceae*, and *Cactaceae* (QUEIROZ *et al.*, 2017).

In contemporary literature, there is a clear divergence between authors regarding classification of phytophysionomies in the CPD. This is due to the difficulty in defining clear boundaries of vegetation transitions, given the great heterogeneity of landscapes (Figure 9) (MORO *et al.*, 2014). To demonstrate a current proposal for classifying vegetation physiognomies, Figure 10 shows the map proposed by Castanho *et al.*, (2020b).

Thorny deciduous forest covers 69% of the CPD area, while evergreen forest is found in high-altitude mountainous areas, which represent only 0.5% of the region (Figure 10). The sum of the areas of thorny deciduous forest, thorny forest/dry forest transition, and tropical dry deciduous forest corresponds to around 83% of the CPD area.

Recursos Naturais Secundários: Vegetação

O surgimento de diferentes tipologias vegetacionais que compõem o DFC é decorrente do arranjo entre os diferentes tipos de solos e do regime pluviométrico da região (NERI *et al.*, 2012). Entre essas tipologias existe o predomínio da floresta tropical seca. O DFC apresenta elevada diversidade de espécies vegetais, com, aproximadamente, 3150 espécies, das quais mais de 725 (23%) são endêmicas (QUEIROZ *et al.*, 2017). As principais características ambientais determinantes dessa diversidade são: a elevada disponibilidade energética diária de 4,8 a 6,0 Kwh m⁻² (PEREIRA *et al.*, 2017); a variabilidade pluviométrica e as altas taxas de evaporação potencial, 1500 mm ano⁻¹ (regiões do litoral) a 3000 na área continental (MOLLE, 1989).

A vegetação de caatinga é constituída, principalmente, de espécies endêmicas lenhosas e herbáceas. As lenhosas são de pequeno porte, dotadas de espinhos, e geralmente caducifólias. Trata-se de uma vegetação rica em espécies de cactáceas e bromeliáceas (NERI *et al.*, 2012; RODRIGUES *et al.*, 2018). Fitossociologicamente, a densidade, frequência e dominância das espécies são determinadas pelas variações topográficas, tipo de solo e pluviosidade (MORO *et al.*, 2016). As espécies mais abundantes na caatinga pertencem à família das leguminosas (*Caesalpinaceae*, *Mimosaceae*, *Fabaceae*); *Euphorbiaceae* e *Cactaceae* (QUEIROZ *et al.*, 2017).

É importante destacar que na literatura contemporânea há clara divergência entre autores quanto à classificação das fitofisionomias do DFC devido à dificuldade em definir limites claros das transições vegetacionais, pela grande heterogeneidade de paisagens (Figura 9) (MORO *et al.*, 2014). Para demonstrar uma proposta atual de classificação de fisionomias da vegetação, apresenta-se na Figura 10 o mapa sugerido por Castanho *et al.*, (2020b).

A floresta decídua espinhosa abrange 69% do território do DFC, enquanto a floresta sempre verde nas áreas montanhosas de altitudes mais elevadas, abrevia-se a apenas 0,5% da região (Figura 10). O somatório das áreas de floresta decídua espinhosa, transição floresta espinhosa/mata seca e floresta tropical decídua seca corresponde a aproximadamente 83% do território do DFC.

In almost all species that make up the CPD, leaf number reduction in response to water stress is also considered a survival strategy to adverse conditions (SANTIAGO *et al.*, 2001). Leaf fall reduces water loss through transpiration, increasing plant resistance to drought.

A redução do número de folhas da quase totalidade das espécies que compõem o DFC quando submetidas a stress hídrico é considerada, também, uma estratégia de sobrevivência às condições adversas (SANTIAGO *et al.*, 2001). A queda das folhas reduz as perdas de água por transpiração e, assim, a planta apresenta maior resistência à seca.

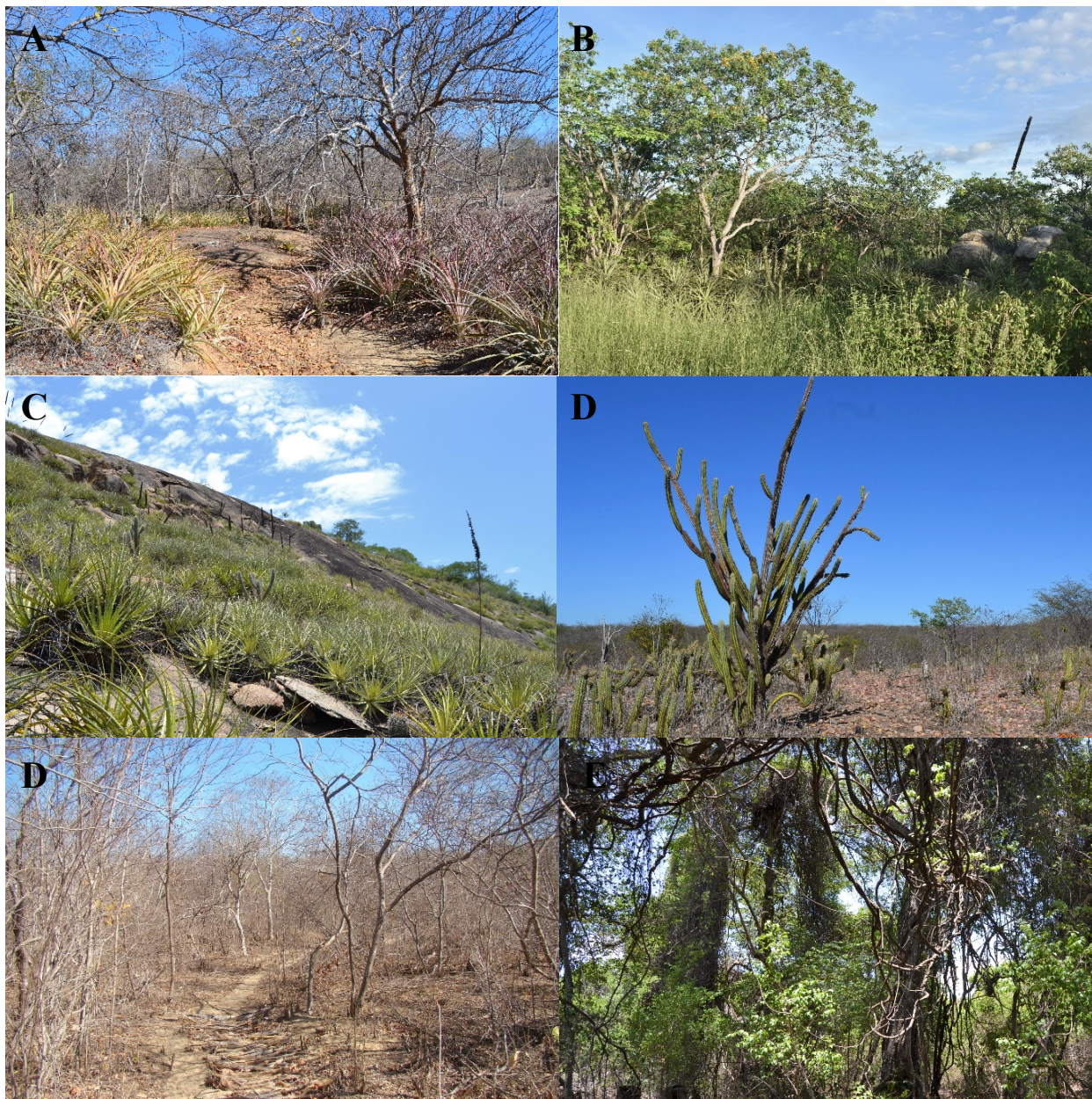


Figure 9 - Examples of the main physiognomies in the CPD. (A) – Thorny deciduous forest, (B) – Dry Forest/ thorny forest transition, (C) – Bromeliads, (D) – Cactaceae, (E) – Dry deciduous forest, (F) – Evergreen Forest. (Pictures: the author)

Figura 9 - Exemplos das principais fisionomias do DFC. (A) – Floresta decídua espinhosa, (B) – Transição floresta seca/mata espinhosa, (C) – Bromélias de serrote, (D) – Cactáceas, (E) – Floresta seca decídua, (F) – Floresta sempre verde. (Fotos: autor).

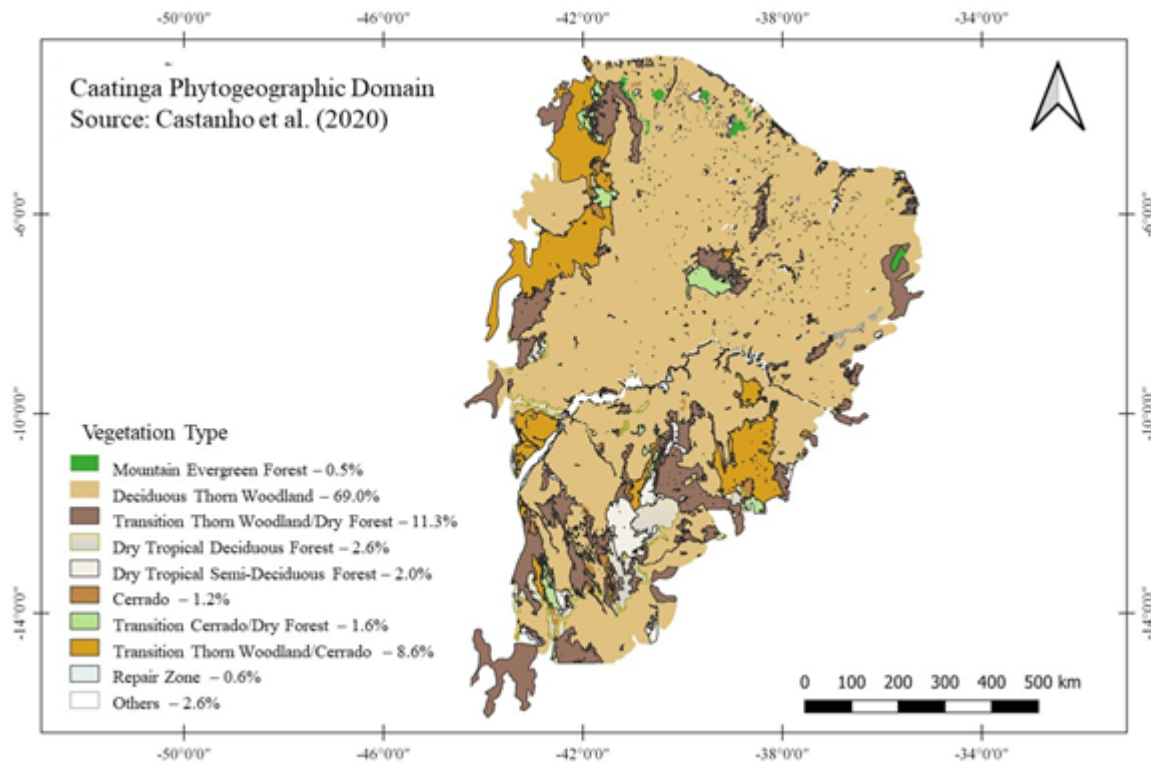


Figure 10 - Map of the proposed vegetation classification in the Caatinga Phytogeographic Domain (CPD) areas, showing distribution of the different physiognomies.

Fonte: (CASTANHO *et al.*, 2020b).

Figura 10 - Mapa da proposta de classificação do potencial de vegetação em áreas do Domínio Fitogeográfico da Caatinga (DFC) mostrando a distribuição de diferentes fisionomias.

Fonte: (CASTANHO *et al.*, 2020b).

Besides leaf senescence, the current literature has shown that CPD plants subjected to severe water deficit tend to invest more in root elongation than shoot growth, in order to absorb water in deeper soil zones (BARBOSA *et al.*, 2000). Plant root architecture and ability to exploit deeper and wetter soil layers, along with a higher root/shoot ratio, are crucial adaptive traits to water deficit of CPD plants (SCALON *et al.*, 2011).

These survival mechanisms help to understand how the species inhabiting CDP manage to develop, presenting genetic characteristics that make it possible to conquer environments considered inhospitable and difficult to survive (TROVÃO *et al.*, 2007). Therefore, these mechanisms should be well understood, as most global climate change forecasts highlight increasingly frequent and extensive drought events (IPCC, 2022), which would lead to changes in the behavior of certain species and increase in desertification in dry regions (SANTOS *et al.*, 2012).

Além da senescência foliar, a literatura reporta que plantas do DFC submetidas a déficit hídrico severo tendem a investir mais no alongamento da raiz do que na parte aérea para, assim, absorver água das zonas mais profundas do solo (BARBOSA *et al.*, 2000). A arquitetura radicular das plantas e capacidade de exploração das camadas mais profundas e úmidas do solo, juntamente com uma maior razão entre raiz e parte aérea, são características importantes de adaptação aos déficits hídricos das plantas do DFC (SCALON *et al.*, 2011).

Estes mecanismos de sobrevivência ajudam a entender como as espécies que habitam a região conseguem se desenvolver, apresentando características genéticas que possibilitam conquistar ambientes considerados inhospitáveis e de difícil sobrevivência (TROVÃO *et al.*, 2007). Torna-se importante o entendimento desses mecanismos, pois a maioria das previsões mundiais sobre a mudança climática destaca eventos de secas cada vez mais frequentes e extensas (IPCC, 2022), o que levaria a mudanças de comportamento de determinadas espécies e aumento da desertificação em regiões secas (SANTOS *et al.*, 2012).

Adverse climatic conditions (water deficit, excess solar energy, low relative humidity) impose essential and peculiar characteristics on the CPD. One of them is high diversity and heterogeneity of species; therefore, large homogeneous forests are rarely found, which would make it fragile. Another is the small size of plants, which improves water balance efficiency. Moreover, soil protection either by vegetation canopy in the rainy season, or by litter deposition especially at the end of the rainy season. Finally, plant species adaptation to semi-arid conditions, i.e., water deficit during several months of the year.

Intense exploitation of vegetation cover, whether for energy production or farming implementation, disregarding their potential and limitations, are the main factors driving the Desertification Susceptible Area in the CPD to environmental degradation (CGEE, 2016). Abusive and disorderly use of vegetation in the CPD has compromised secondary vegetation succession, leading to a disclimax condition (ARAÚJO FILHO, 2013; DUQUE, 1980). This stage characterizes a poorly-biodiverse community, which is basically composed of spontaneous pioneer species, with an almost non-existent seed bank (ARAÚJO FILHO, 2013).

Currently, areas of dense arboreal caatinga represent 10% of the vegetation in the CPD. This vegetation is on patches of better-quality soils and rainfall above the average for the biome. Although present in small areas of the CPD, plants perform important functions for the system, whether as a refuge for fauna, protection of springs, availability of organic matter, and carbon fixation, in addition to functioning as a seed bank for native species. Another serious problem faced by the vegetation resource in the CPD is the fallow length required for secondary vegetation succession.

In addition to climatic and edaphic conditions, anthropic pressure acts in a disorderly way on vegetation arrangement in the CPD, resulting in extensive areas where plant species with low biomass production predominate. The demographic pressure results in a situation, in which, about 80% of the vegetation cover is classified as secondary, and 40% is maintained in a pioneer stage of secondary succession. Besides of that, desertification has already affected approximately 25% of the area (ARAÚJO FILHO, 2013).

As condições climáticas adversas (déficit hídrico, excesso de energia solar, baixa umidade relativa do ar) impõem ao DFC características essenciais e peculiares, tais como: alta diversidade e heterogeneidade das espécies (raramente se encontra grandes bosques homogêneos, o que a tornaria frágil; porte baixo (maior eficiência no balanço hídrico); proteção do solo (tendência de sempre manter o solo coberto, seja pelo dossel da vegetação na estação chuvosa, seja pela serapilheira depositada sobre o solo, principalmente ao encerrar a estação chuvosa) e adaptação das espécies às condições da semiaridez (adaptação ao déficit hídrico durante vários meses do ano).

A intensa exploração da vegetação, seja para produção de energia ou implantação de sistemas agropecuários, desconsiderando suas potencialidades e limitações, são os principais fatores que estão conduzindo a Área Suscetível à Desertificação do DFC à degradação ambiental (CGEE, 2016). O uso abusivo e desordenado da vegetação do DFC tem comprometido a sucessão secundária da vegetação, levando a uma condição de disclimax (ARAÚJO FILHO, 2013; DUQUE, 1980). Tal estágio caracteriza uma baixa biodiversidade da comunidade vegetacional, passando a ser composta, basicamente, por espécies espontâneas pioneiras com um banco de sementes praticamente inexistente (ARAÚJO FILHO, 2013).

As áreas de caatinga arbórea densa representam, atualmente, 10% da vegetação do DFC e estão presentes nas manchas de melhores solos e precipitação superior à pluviosidade média do bioma. Embora presente em pequenas áreas do DFC, as plantas desempenham importantes funções para o sistema, seja como refúgio da fauna, proteção das nascentes, disponibilidade de matéria orgânica e fixação de carbono, e, também, exercem a função de banco de sementes das espécies nativas. Outro sério problema enfrentado pelo recurso vegetação do DFC é o tempo de pousio necessário para que a sucessão secundária da vegetação ocorra.

A pressão antrópica de forma desordenada sobre o arranjo da vegetação do DFC, o qual é definido pelas condições climáticas e edáficas, resultou em extensas áreas onde predominam espécies vegetais com baixa produção de biomassa. A pressão demográfica sobre o recurso resulta em um quadro em que, aproximadamente, 80% da cobertura vegetal é classificada como secundária e 40% é mantida em estágio pioneiro da sucessão secundária, sendo que a desertificação já atinge aproximadamente 25% da área (ARAÚJO FILHO, 2013).

Knowing how climate determines biomass distribution in the CPD becomes essential to understand the effect of potential climate changes on biomass production in the region. Castanho *et al.* (2020) found that 70 to 90% of the highest biomass production ($>40 \text{ Mg ha}^{-1}$) occurs in the wetter regions (rainfall $>1000 \text{ Mg ha}^{-1}$), with a rainless period of less than two months. On the other hand, a high fraction of low biomass production (from 0 to 40 Mg ha^{-1}) is present in the driest regions (rainfall $<600 \text{ Mg ha}^{-1}$), with a dry season longer than eight months.

Biomass production exhaustion in the CPD can be confirmed by facts such as: (a) 50% of the area has biomass production below 2 Mg ha^{-1} , corresponding to 1% of the total biomass in the CPD (Figure 11); (b) 23% of the total area has biomass production between 2 and 40 Mg ha^{-1} , representing 14% of the total biomass; (c) only 7% of the area is responsible for 31% of all biomass produced, varying from 80 to 130 Mg ha^{-1} .

Ter conhecimento de como o clima determina a distribuição de biomassa no DFC torna-se essencial para se entender o efeito de possíveis mudanças climáticas na produção de biomassa na região. Castanho *et al.*, (2020) identificaram que 70 a 90% da maior produção de biomassa ($> 40 \text{ Mg ha}^{-1}$) ocorre nas regiões mais úmidas (precipitação $> 1000 \text{ Mg ha}^{-1}$ e com período sem chuva inferior a dois meses). Por outro lado, a elevada fração da baixa produção de biomassa (de 0 a 40 Mg ha^{-1}) está presente nas regiões mais secas (precipitação $< 600 \text{ Mg ha}^{-1}$), com estação seca superior a oito meses.

A exaustão da produção de biomassa no DFC se confirma em fatos como: (a) 50% do território apresenta produção de biomassa menor que 2 Mg ha^{-1} , correspondendo a 1% do total da biomassa do DFC (Figura 11); (b) 23% da área total do DFC tem uma produtividade variando de 2 a 40 Mg ha^{-1} , representando 14% da biomassa total; (c) apenas 7% do território é responsável por 31% de toda a biomassa produzida, onde se encontra uma produtividade variando de 80 a 130 Mg ha^{-1} .

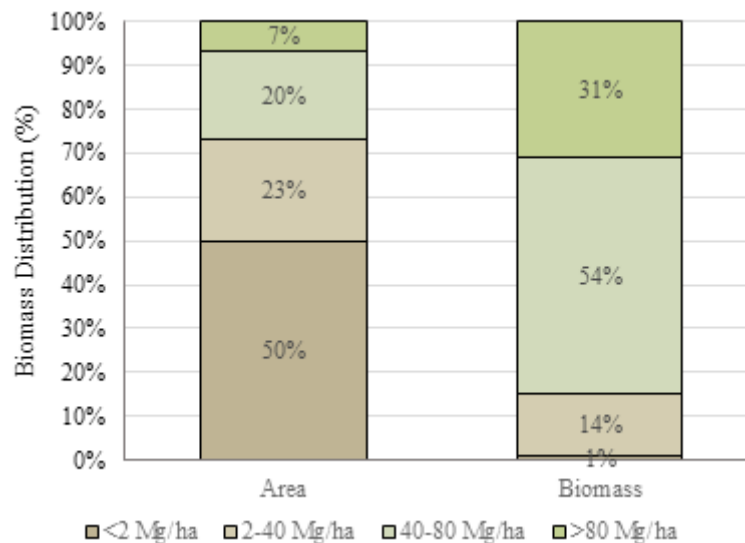


Figure 11 - Area fraction and corresponding biomass production in the Caatinga Phytogeographic Domain (CPD) areas.

Fonte: (CASTANHO *et al.*, 2020b).

Figura 11 - Fração da área e produção de biomassa correspondente em áreas do Domínio Fitogeográfico da Caatinga (DFC).

Fonte: (CASTANHO *et al.*, 2020b).

This greater production is found in rainforests, many of them resulting from orographic effect (ANDRADE *et al.*, 2020). Another point that strongly expresses vegetation vulnerability in the CPD in face of exploitation model adopted is that 73% of its area is responsible for only 15% of the total biomass produced.

In short, our findings represent the “X-ray” of the current vegetation in the CPD. Such situation is a consequence of pressure on the resource superior to its bearing capacity and aptitude. Therefore, the scarcity of biomass production in the region is enlightened due to either climatic conditions or vegetation degradation by anthropic action.

CLOSING REMARKS

In view of the above, extreme condition in the CPD in terms of natural resources becomes evident. On one side are the scarce resources (water, soil, and vegetation) and on the other side the abundant resource (solar energy). The question is: is the CPD development based on abundant or scarce resources? Throughout its short history, after discovery (520 years ago), the region has developed based on two scarce resources, water and soil. The first is due to the uncertainty of its distribution in the rainy season. The latter is due to its fragile traits: shallow, poor in organic matter, susceptible to erosion, and high salinity. Regarding solar energy, there is no uncertainty as to its occurrence in the CPD, thus being an ever-abundant resource.

Therefore, the CPD is characterized by a high positive balance between solar energy and water deficit, fragile soils, and low biomass production when compared to other Brazilian biomes. Energy availability, combined with low air humidity, results in high evaporative rates from water bodies and wet surfaces. In a vision based on the Sustainable Development Goals (SDGs), the region has high levels of uncertainty regarding a sustainable scale agricultural production, given the frequency of dry years (ANDRADE *et al.* 2016).

Essa maior produtividade se encontra nas matas de florestas úmidas, muitas delas decorrentes do efeito orográfico (ANDRADE *et al.*, 2020). Outro ponto que muito expressa a vulnerabilidade da vegetação do DFC ante o modelo de exploração adotado é o fato de que 73% do seu território é responsável por apenas 15% da biomassa total produzida.

Esse é o “raio x” da vegetação, hoje, presente no DFC, resultante de uma pressão sobre o recurso, superior à sua capacidade de suporte e aptidão. Fica claro a escassez da região para produção de biomassa, seja pelas condições climáticas seja pela degradação do recurso pela ação antrópica.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ante o exposto, fica evidente a condição extrema do DFC em relação aos seus recursos naturais. Pode-se afirmar que em um lado da balança estão os recursos escassos (água, solo e vegetação) e do outro o recurso abundante (energia solar). A questão é: fundamenta-se o desenvolvimento do DFC em recursos abundantes ou recursos escassos? Sabe-se que ao longo da sua curta história, após o descobrimento (520 anos), o desenvolvimento da região fundamenta-se em dois recursos escassos – água e solo: a água, pela incerteza da sua distribuição na estação chuvosa, e os solos por sua fragilidade – rasos, pobres em matéria orgânica, susceptíveis a erosão e salinidade. Já com relação ao recurso energia solar no DFC, não existe incerteza quanto à sua ocorrência. É um recurso sempre abundante.

Portanto, o DFC se caracteriza pelo elevado saldo positivo da energia solar, déficit hídrico, solos frágeis e baixa produção de biomassa vegetal, quando comparado aos outros biomas brasileiros. A disponibilidade energética combinada com a baixa umidade do ar resulta em elevadas taxas evaporativas dos corpos hídricos e das superfícies úmidas. Em uma visão fundamentada nos objetivos de desenvolvimento Sustentável (ODSs), a região apresenta elevados índices de incerteza para uma produção sustentável, em escala, da agropecuária, bastando observar a frequência de ocorrência de anos secos (ANDRADE *et al.* 2016).

There is a need for a new look at the PCD to outline a development model (Figure 12) based on the potential of its natural resources, inhabitants, techniques, and products to be obtained with the least amount of uncertainty. The new model must be developed based on the Sustainable Development Goals (SDGs) defined by the UN.

Smallholder farming must be seen as a means of producing food for local families and as part of the local culture, but never the main economy of the production unit. Finally, abundant resources should be explored over scarce ones, thus conserving the biome. And last but not least, the sharing of this resource must be democratized, not concentrated in the hands of the fortunate few.

Há necessidade de um novo olhar sobre o DFC para traçar um modelo de desenvolvimento (Figura 12) fundamentado nas potencialidades dos recursos naturais, no homem, nas técnicas e nos produtos que são obtidos com o mínimo de incertezas. O novo modelo deve ser desenvolvido com base nos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) definidos pela ONU.

A agropecuária a nível de pequenos produtores deve ser vista como meio de produção de alimento para a família e integrante da cultura local; mas jamais o vetor da economia da unidade produtiva. Por fim, é recomendável explorar o que se tem em abundância, conservando o bioma e parar de explorar o que é escasso. Espera-se que o compartilhamento desse recurso seja democratizado, não se concentrando nas mãos dos poucos afortunados.

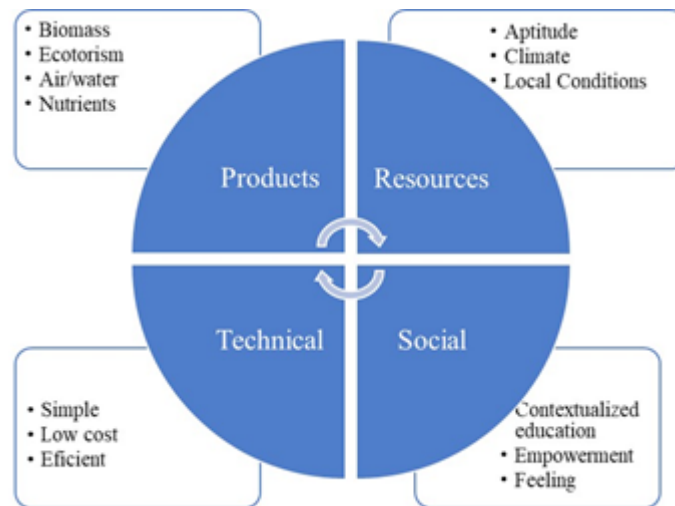


Figure 12 - Arrangement of resources for a new model of in the Caatinga Phytogeographic Domain (CPD) development based on the Sustainable Development Goals (SDG).

Figura 12 - Arranjo dos recursos para um novo modelo de desenvolvimento em áreas do Domínio Fitogeográfico da Caatinga (DFC) fundamentado nos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS).

ACKNOWLEDGEMENTS

The National Council for Scientific and Technological Development (CNPq); The Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FUNCAP) for the financial support; The students enrolled in the research group Manejo de Água e Solo no Semiárido - MASSA (Water and Soil Management in the Semi-arid), who were essential for this research; Graduate Studies/UFRR supported the publication of the study (EDICT 05/2021 – PRPPG/PRÓ - PESQUISA/APOIO ÀS REVISTAS CIENTÍFICAS DA UFRR – LINHA III) and the Federal University of Ceará.

AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq; À Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico - FUNCAP pelo suporte financeiro ao desenvolvimento das pesquisas cujo resultados foram empregados nesse documento. Agradecemos; Aos estudantes do grupo de pesquisa Manejo de Água e Solo no Semiárido - MASSA, essenciais no desenvolvimento das pesquisas realizadas; À Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação/UFRR que apoiou a publicação (EDITAL 05/2021 – PRPPG/PRÓ-PESQUISA/APOIO ÀS REVISTAS CIENTÍFICAS DA UFRR – LINHA III) e à Universidade Federal do Ceará.

CITED SCIENTIFIC LITERATURE

- AGUIRRE-GUTIÉRREZ, J.; OLIVERAS, I.; RIFAI, S.; FAUSET, S.; ADU-BREDU, S.; AFFUMBAFFOE, K.; BAKER, T.; FELDPAUSCH, T.; GVOZDEVAITE, A.; HUBAU, W.; KRAFT, N. J. B.; LEWIS, S. L.; MOORE, S.; NIINEMETS, U.; PEPRAH, T.; PHILLIPS, O. L.; ZIEMIŃSKA, K.; ENQUIST, B.; MALHI, Y. Drier tropical forests are susceptible to functional changes in response to a long-term drought. **Ecology Letters**, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1111/ele.13243>
- ALLEN, K.; DUPUY, J. M.; GEI, M. G.; HULSHOF, C.; MEDVIGY, D.; PIZANO, C.; SALGADO-NEGRET, B.; SMITH, C. M.; TRIERWEILER, A.; BLOEM, S. J. V.; WARING, B. G.; XU, X.; POWERS, J. S. Will seasonally dry tropical forests be sensitive or resistant to future changes in rainfall regimes? **Environmental Research Letters**, v. 12, n. 2, 023001, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa5968>
- ALVES, J. M. B.; SERVAIN, J.; CAMPOS, J. N. B. Relationship between ocean climatic variability and rain-fed agriculture in northeast Brazil. **Climate Research**, v. 38, p. 225-236, 2009. DOI: <https://doi.org/10.3354/cr00786>
- ANDRADE, E. M.; SENA, M. G. T.; SILVA, A. G. R.; PEREIRA, F. J. S.; LOPES, F. B. Uncertainties of the rainfall regime in a tropical semi-arid region: the case of the State of Ceará. **Revista Agro@ambiente**, v. 10, n. 2, p. 88-95, 2016. DOI: <https://doi.org/10.18227/1982-8470ragro.v10i2.3500>
- ANDRADE, E. M.; AQUINO, D. N.; CHAVES, L. C. Water as capital and its uses in the Caatinga, In: SILVA, J. M. C.; LEAL, I. R.; TABARELLI, M. Caatinga: The Largest Tropical Dry Forest Region. in South America 1. ed. Gewerbetrasse: Springer, 2017. Cap.10, p.281-302. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-68339-3_10
- ANDRADE, E. M.; GUERREIRO, M. J. S.; PALÁCIO, H. A. Q.; CAMPOS, D. A. Ecohydrology in a Brazilian tropical dry forest: Thinned vegetation impact on hydrological functions and ecosystem services. **Journal of Hydrology: Regional Studies**. v. 27, n. 100649, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2019.100649>

- ARAÚJO FILHO, J. A. 2013. **Manejo Pastoril Sustentável da Caatinga**. 1ed. Recife, Projeto Dom Helder Camara. 200p. il. ISBN: 978-85-64154-04-9.
- BARBOSA, D. C.; NOGUEIRA, R. J. M. C.; MELO FILHO, P. A. Comparative studies of growth in three species of “caatinga” submitted to water stress. **Phyton**, v. 69, n. 1, p. 45-50, 2000.
- BORGES, F. Q. Tarifa de energia elétrica e desenvolvimento sustentável paraense. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 2, e7210212275, 2021. DOI: <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i2.12275>
- BRASIL, J. B.; GUERREIRO, M. S.; ANDRADE, E. M.; PALÁCIO, H. A. Q.; MEDEIROS, P. H. A.; Ribeiro Filho, J. C. Minimum Rainfall Inter-Event Time to Separate Rainfall Events in a Low Latitude Semi-Arid Environment. **Sustainability**, v. 14, p. 1721, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/sul4031721>
- BYRNE, R.; MBEVA, K. **The political economy of state-led transformations in pro-poor low carbon energy: a case study of solar PV in Kenya**, STEPS Working Paper 91, Brighton: STEPS Centre, 2017. Available at: <http://opendocs.ids.ac.uk/opendocs/handle/123456789/12968> (accessed 17.01.2022)
- CAMPOS, D. A.; ANDRADE, E. M. Seasonal trend of climate variables in an area of the Caatinga phytogeographic domain. **Revista Agro@mbiente On-line**, n. 15, v. 2021. DOI: <https://doi.org/10.18227/1982-8470ragro.v15i0.6833>
- CAMPOS, J. N. B. Águas superficiais no semiárido brasileiro: Desafios ao atendimento aos usos múltiplos. In: Medeiros SS, Gheyi HR, Galvão CO, Paz VPS (eds) **Recursos Hídricos em regiões áridas e semiáridas**, 1.ed. Instituto Nacional do Semiárido, Campina Grande, pp 250–268, 2011.
- CASTANHO, A. D. A.; COE, M. T.; BRANDO, P.; MACEDO, M.; BACCINI, A.; WALKER, W.; ANDRADE, E. M. Potential shifts in the aboveground biomass and physiognomy of a seasonally dry tropical forest in a changing climate. **Environmental Research Letters**. 2020a, 15, 034053. DOI: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab7394>
- CASTANHO, A. D. A.; COE, M. T.; ANDRADE, E. M.; WALKER, W.; BACCINI, A.; CAMPOS, D. A.; FARINA, M. A close look at above ground biomass of a large and heterogeneous Seasonally Dry Tropical Forest - Caatinga in North East of Brazil. **Annals of the Brazilian Academy of Sciences**, v. 92, n. 1, e20190282. 2020b. DOI: <https://doi.org/10.1590/0001-3765202020190282>
- CGEE - CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS. **Desertificação, degradação da terra e secas no Brasil**. Brasília, DF: 2016. 252p. Available at: <https://www.cgee.org.br/documents/10195/734063/DesertificacaoWeb.pdf>. (Accessed 15.07.2022)
- DEWEES, P.; CAMPBELL, B.; KATERERE, Y.; SITO, A.; CUNNINGHAM, A.; ANGELSEN, A.; WUNDER, S. **Managing the Miombo woodlands of southern Africa: Policies, incentives, and options for the rural poor**. Washington DC: Program on Forests (PROFOR), 2011. Available at: https://www.profor.info/sites/profor.info/files/Miombo_web_0.pdf. (Accessed 9.05.2022)
- DEXTER, K. G.; PENNINGTON, R. T.; OLIVEIRA-FILHO, A.T.; BUENO, M.L.; SILVA DE MIRANDA, P. L.; NEVES, D.M. **Inserting Tropical Dry Forests Into the Discussion on Biome Transitions in the Tropics**. *Frontiers in Ecology and Evolution*, v. 6, n. 104, 2018. DOI: <https://doi.org/10.3389/fevo.2018.00104>
- DUQUE, S. G. **Solo e água no polígono das secas**. 5.ed. Mossoró: ESAM, 1980. 273p. (Coleção Mossoroense, 142).
- EMBRAPA SOLOS – **Mapa de Solos do Brasil: Distribuição geográfica dos solos do Brasil, de acordo com Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS, 2006)**, classificado até o terceiro nível categórico. Escala 1:5.000.000. (2020). Disponível no site: http://geoinfo.cnps.embrapa.br/layers/geonode%3Abrasil_solos_5m_20201104. (accessed 21.05.2022)
- ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **EPA Water Research [WWW Document]**. 2018. URL <https://www.epa.gov/water-research>. (accessed 2.08.22).

- FAO. **Ecosystem Services & Biodiversity (ESB)** [WWW Document]. 2019. URL <http://www.fao.org/ecosystem-services-biodiversity/background/en/> (accessed 12.07.19).
- FERREIRA, A. G; MELLO, N. G. S. Principais sistemas atmosféricos atuantes sobre a região nordeste do Brasil e a influência dos oceanos pacífico e atlântico no clima da região. **RB Agro**, v. 1, n. 1, p. 15-28, 2005
- GUERREIRO, M. J. S.; ANDRADE, E. M.; LAJINHA, I. A. T. Long-term variation of precipitation indices in Ceará State, northeast Brazil. **International Journal of Climatology**, v. 33, n. 14, p. 2929-2939, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1002/joc.3645>
- GUERREIRO, M. S.; ANDRADE, E. M.; PALÁCIO, H. A. Q.; BRASIL, J. B.; RIBEIRO FILHO, J. C. Enhancing ecosystem services to minimize impact of climate variability in a dry tropical forest with vertisols. **Hydrology**, v. 8, n. 46, p. 2-12, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/hydrology8010046>.
- HUANG, J.; LI, Y.; FU, C.; CHEN, F.; FU, Q.; DAI, A.; SHINODA, M.; MA, Z.; GUO, W.; LI, Z.; ZHANG, Y.; LIU, H.; YU, Y.; HE, Y.; XIE, X.; GUAN, M.; JI, L.; LIN, S.; WANG, H.; YAN, G. Dryland climate change: Recent progress and challenge. **Reviews of Geophysics**, v. 55, p. 719-778, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1002/2016RG000550>.
- IBGE/SIDRA – Sistema IBGE de Recuperação Automática. **Censo Agropecuário 2017: resultados definitivos**. Rio de Janeiro: IBGE, 2019. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/censo-agropecuario/censo-agropecuario-2017>>. (accessed 10.08.2022)
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Biomass e sistema costeiro-marinho do Brasil: compatível com a escala 1:250.000**. Rio de Janeiro, Coordenação de Recursos Naturais e Estudos Ambientais. 168 p. Série Relatórios Metodológicos, v. 45, 168p. 2019.
- IPCC - **Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability**. 2022. Disponível em www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/downloads/report/IPCC_AR6_WGII_TechnicalSummary.pdf (accessed 04.08.2022)
- LAL, R. Saving global land resources by enhancing eco-efficiency of agroecosystems. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 73, n. 4, p. 100A-106A, 2018. DOI: <https://doi.org/10.2489/jswc.73.4.100A>
- MAIA, R. P.; BEZERRA, F. H. R.; SALES, V. C. Geomorfologia do Nordeste: concepções clássicas e atuais acerca das superfícies de aplainamento nordestinas. **Revista de Geografia**, v. especial VIII SINAGEO, n. 1, p. 6-19, 2010.
- MARENGO, J. A.; TORRES, R. R.; ALVES, L. M. Drought in Northeast Brazil—past, present, and future. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 129, p. 1189-1200, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00704-016-1840-8>
- MARTINS, F. R.; ABREU, S. L.; PEREIRA, E. B. Scenarios for solar thermal energy applications in Brazil. **Energy Policy**, v. 48, p. 640-649, 2012.
- MILES, L.; NEWTON, A. C.; DEFRIES, R. S.; RAVILIOUS, C.; MAY, I.; BLYTH, S.; KAPOV, V.; GORDON, J. E. A global overview of the conservation status of tropical dry forests. **Journal of Biogeography**, v. 33, n. 3, p. 491-505, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2005.01424.x>
- MOLLE, F. **Perdas por evaporação e infiltração em pequenos açudes**. Recife. SUDENE/DPG/PRN/GT.HHE, 1989. 175p. il. (Brasil.SUDENE.Hidrologia, 25), pp 11-70.
- MORO, M. F.; LUGHADHA, E. N.; FILER, D. L.; ARAÚJO, F. S.; MARTINS, F. R. A catalogue of the vascular plants of the Caatinga Phytogeographical Domain: a synthesis of floristic and phytosociological surveys. **Phytotaxa**, v. 160, n. 1, p. 118, 2014. DOI: <https://doi.org/10.11646/phytotaxa.160.1.1>
- MORO, M. F.; NIC, L. E.; FILER, D. L.; ARAÚJO, F. S.; MARTINS, F. R. A Phytogeographical Metaanalysis of the Semiarid Caatinga Domain in Brazil. **Botanical Review**, v. 82, n. 2, p. 91-148, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12229-016-9164-z>

- NERI, A. V.; SCHAEFER, C. E. G. R.; SILVA, A. F.; SOUZA, A. L.; FERREIRA-JUNIOR, W. G.; MEIRA-NETO, J. A. A. The influence of soils on the floristic composition and community structure of an area of Brazilian Cerrado vegetation. **Edinburgh Journal of Botany**, v. 69, p. 1-27, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0960428611000382>.
- NGWIRA, A.; JOHNSEN, F. H.; AUNE, J. B.; MEKURIA, M. THIERFELDER, C. Adoption and extent of conservation agriculture practices among smallholder farmers in Malawi. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 69, n. 2, p. 107-119, 2014. DOI: <https://doi.org/10.2489/jswc.69.2.107>
- NOBRE, P.; PEREIRA, E. B.; LACERDA, F. F.; BURSZTYN, M.; HADDAD, E. A.; LEY, D. Solar smart grid as a path to economic inclusion and adaptation to climate change in the Brazilian Semiarid Northeast. **International Journal of Climate Change Strategies and Management**, v. 11, n. 4, p. 499-517, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1108/IJCCSM-09-2018-0067>
- PAGANO, M. C.; ZANDAVALLI, R. B.; ARAÚJO, F. S. Biodiversity of arbuscular mycorrhizas in three vegetational types from the semiarid of Ceará State, Brazil. **Applied Soil Ecology**, v. 67, p. 37-46, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2013.02.007>
- PEREIRA, E. B. *et al.*, **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. 2 ed São José dos Campos: INPE, 2017. 80p.: il. DOI: <https://doi.org/10.34024/978851700089>.
- QUEIROZ, L. P. E.; CARDOSO, D.; FERNANDES, M. F.; MORO, M. F.; 2017. Diversity and Evaluation of Flowering Plants of the Caatinga Domain. In: SILVA, J. M. C.; LEAL, I. R.; TABARELLI, M. Caatinga: The Largest Tropical Dry Forest Region. in South America 1. ed. Gewerbetrasse: Springer, 2017. Cap. 2, p. 23-64. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-68339-3_10
- REIS, J. N. P. A insustentável distribuição da terra no semiárido brasileiro. **Caderno de Ciências Sociais Aplicadas**, v. 16, n. 27, p. 21-38, 2019. DOI: <https://doi.org/10.22481/ccsa.v16i27.5178>
- RODRIGUES, P. M. S.; SCHAEFER, C. E. G. R.; SILVA, J. O.; FERREIRA JÚNIOR, W. G.; SANTOS, R. M.; NERI, A. V. The influence of soil on vegetation structure and plant diversity in different tropical savannic and forest habitats. **Journal of Plant Ecology**, v. 11, n. 2. p. 226-236, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1093/jpe/rtw135>
- ROMERO, R. E.; FERREIRA, T.O. Morfologia e classificação dos solos predominantes no semiárido cearense. In: ANDRADE E. M.; PEREIRA O. J.; DANTAS, F. E. R. Semiárido e o manejo dos recursos naturais. 2ed., Fortaleza: Imprensa Universitária, 2016. Cap. 2, p23-55,
- SÁ, I. B.; TAURA, T. A. **Bioma Caatinga: Neossolos**. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. 2021. Disponível no site: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/tematicas/bioma-caatinga/solos/neossolos>. Acesso em: 24 jul 2022.
- SAADI, A. Neotectônica da plataforma Brasileira: Esboço e interpretações preliminares. **Geonomos**, v. 1, n. 1, p. 1-15, 1993. DOI: <https://doi.org/10.18285/geonomos.v1i1e2.233>
- SANTIAGO, A. M. P.; NOGUEIRA, R. J. M. C.; LOPES, E.C. Crescimento em plantas jovens de *Mimosa Caesalpinifolia* Benth., cultivadas sob estresse hídrico. **Revista Ecosistema**, v. 26, n. 1, p. 23-30, 2001.
- SANTOS, M. G. et al Caatinga, the Brazilian dry tropical forest: can it tolerate climate changes? **Theoretical and Experimental Plant Physiology**, v. 26, p. 83-99, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40626-014-0008-0>
- SANTOS, R. M.; OLIVEIRA-FILHO, A. T.; EISENLOHR, P. V.; QUEIROZ, L. P.; CARDOSO, D. B. O. S.; MARIA RODAL, M. J. N. Identity and relationships of the Arboreal Caatinga among other floristic units of seasonally dry tropical forests (SDTFs) of north-eastern and Central Brazil. **Ecology and Evolution**, v. 2, n. 2, p. 409-428. 2012. DOI: <https://doi.org/10.1002/ece3.91>.

- SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; ARAÚJOFILHO, J. C. de; OLIVEIRA, J. B.; CUNHA, T. J. F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2018. 356p
- SCALON, S. P. Q.; ROSILDA MARA MUSSURY, R. M.; EUZÉBIO, V. L. M.; KODAMA, F. M.; KISSMANN, C. Estresse hídrico no metabolismo e crescimento inicial de mudas de mutambo (*Guazuma ulmifolia* Lam.). **Revista Ciência Florestal**, v. 21, n. 4, p. 655-662, 2011. DOI: <https://doi.org/10.5902/198050984510>
- SCHLECHT, M.; MEYER, R. Site selection and feasibility analysis for concentrating solar power (CSP) systems. In: LOVEGROVE, K.; STEIN, W. **Concentrating solar power technology**. Cambridge: Woodhead, 2021 Cap. 4, p.99-125.
- SILVA DE MIRANDA P L, OLIVEIRA-FILHO A T, PENNINGTON R T, NEVESDM, BAKER T R., DEXTERKG. Using tree species inventories to map biomes and assess their climatic overlaps in lowland tropical South America. **Global Ecology and Biogeography**, v. 27, n. 8, p. 899-912, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1111/geb.12749>
- SILVA, R. M. A.; AQUINO, J. R.; COSTA, F. B.; NUNES, E. M. Características produtivas e socioambientais da agricultura familiar no Semiárido brasileiro: evidências a partir do Censo Agropecuário 2017. **Desenvolvimento Meio Ambiente**, v.55, Edição especial - Sociedade e ambiente no Semiárido: controvérsias e abordagens, p. 314-338, 2020. DOI: <https://doi.org/10.5380/dma.v55i0.73745>
- SUN, L.; LI, H.; WARD, M. N. Climate Variability and Corn Yields in Semiarid Ceará, Brazil. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 46, n. 2, p. 226-240, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1175/JAM2458.1>
- TORRES, R. R.; FERREIRA, N. J. Case Studies of Easterly Wave Disturbances over Northeast Brazil Using the Eta Model. **Weather and Forecasting**, v. 26, n. 2, p. 225-234, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1175/2010WAF2222425.1>
- TROVÃO, D. M. B. M., FERNANDES, P. D.; ANDRADE, L. A.; JOSÉ DANTAS NETO, J. Variações sazonais de aspectos fisiológicos de espécies da Caatinga. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental**, v. 11, n. 3, p. 307-311, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662007000300010>
- UNITED NATIONS, **Sustainable Development Goals** (SDGs), 2019. [WWW Document]. URL <https://www.sustainabledevelopment.un.org/gsd2019> (accessed 12.07.19)
- VIDAL, M. F; SILVA, R. G.; NEIVA, J. N. M.; CÂNDIDO, M. J. D.; SILVA, D. S.; PEIXOTO, M. J. A. Análise econômica da produção de ovinos em lotação rotativa em pastagem de capim tanzânia (*Panicum maximum* (Jacq)). **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 44, p. 801-818, 2006.