

RECUPERAÇÃO AMBIENTAL EM ÁREAS DE PRODUÇÃO DE PETRÓLEO E GÁS EM TERRA NA CAATINGA

Alexander Silva de Resende
Guilherme Montandon Chaer
Editores Técnicos



Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Embrapa Agrobiologia
Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento
Petrobras

RECUPERAÇÃO AMBIENTAL EM ÁREAS DE PRODUÇÃO DE PETRÓLEO E GÁS EM TERRA NA CAATINGA

Alexander Silva de Resende
Guilherme Montandon Chaer
Editores Técnicos

Embrapa
Brasília, DF
2021

Embrapa Agrobiologia

Rodovia BR 465, km 7
CEP 23891-000 Seropédica, RJ
Caixa Postal 74.505
Fone: (21) 3441-1500
Fax: (21) 2682-1230
www.embrapa.br
www.embrapa.br/fale-conosco/sac

Unidade responsável pela edição

Embrapa Agrobiologia

Comitê Local de Publicações

Presidente

Bruno José Rodrigues Alves

Secretária Executiva

Carmelita do Espírito Santo

Membros

Cláudia Pozzi Jantalia

Janaina Ribeiro Costa Rouws

Luc Felicianus Marie Rouws

Luis Cláudio Marques de Oliveira

Luiz Fernando Duarte de Moraes

Marta dos Santos Freire Ricci de Azevedo

Nátia Élen Auras

Revisão de texto

Maria Elizabeth Fernandes Correia

Eliane Maria Ribeiro da Silva

Luiz Fernando Duarte de Moraes.

Normalização bibliográfica

Carmelita do Espírito Santo

Projeto Gráfico, capa e editoração eletrônica

CV Design Projetos de Comunicação

Foto da capa

Alexander Silva de Resende e

Guilherme Montandon Chaer

1ª edição

Publicação digital - PDF (2021)

Todos os direitos reservados.

A reprodução não autorizada desta publicação, no todo ou em parte, constitui violação de direitos autorais (Lei nº 9.610).

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação - (CIP)

Embrapa Agrobiologia

R433r

Resende, Alexander Silva de.

Recuperação ambiental em áreas de produção de petróleo e gás em terra na Caatinga. / Alexander Silva de Resende, Guilherme Montandon Chaer, editores técnicos. Brasília, DF : Embrapa, 2021.

PDF (149 p.) : il. color.

ISBN: 978-65-87380-49-0

1. Recuperação de áreas degradadas. 2. Espécies arbóreas. 3. Petróleo e gás. 4. Piçarra. 5. Bioma Caatinga. I. Chaer, Guilherme Montandon. II. Título. III. Petrobras. IV. Ufersa.

CDD (23. ed.) 634.956

AUTORES

Alexander Silva de Resende

Engenheiro Florestal, doutor em Ciência do Solo, pesquisador da Embrapa Agrobiologia, Seropédica, RJ.

Carlos Fernando da Cunha

Técnico em Química, assistente de pesquisa da Embrapa Agrobiologia, Seropédica, RJ.

Cid Rodrigo Cavalcanti

Contador, especialista em Licenciamento Ambiental, analista de meio ambiente sênior da Potiguar E&P S.A., Mossoró, RN.

Cláudia Pavan Lamarca

Bióloga, especialista em Gestão Ambiental, analista da Fundação de Apoio a Pesquisa e ao Desenvolvimento, Rio de Janeiro, RJ.

Cristiano Machado Silveira

Biólogo, mestre em Ecologia, analista ambiental do Cenpes-Petrobras, RJ.

Eduardo Francia Carneiro Campello

Engenheiro Florestal, doutor em Ciência Florestal, pesquisador da Embrapa Agrobiologia, Seropédica, RJ.

Erick Daniel Gomes da Silva

Engenheiro Florestal, especialista em Gestão Ambiental Urbana, mestrando Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB.

Erik Gaertner Petric

Biólogo, mestre em Ecologia e Biomonitoramento, analista ambiental da Gerência Executiva de Segurança, Meio Ambiente e Saúde da Petrobras, Macaé, RJ.

Fernando Lima Aires Gonçalves

Engenheiro Florestal, doutor em Ciências Ambientais e Florestais, analista técnico da Inocas Soluções em Meio Ambiente, Patos de Minas, MG.

Felipe Ferreira da Silva

Engenheiro Florestal, mestre em Ciências Ambientais e Florestais, doutorando da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ.

Frederico Santos Machado

Engenheiro-agrônomo, mestre em Ciência do Solo, engenheiro de meio ambiente sênior do Cenpes-Petrobras, Rio de Janeiro, RJ.

Guilherme Montandon Chaer

Engenheiro-agrônomo, doutor em Ciência do Solo, pesquisador da Embrapa Agrobiologia, Seropédica, RJ.

Ivanil Ribeiro Cruz

Comunicador Social, especialista em Geoprocessamento, sócio da Commutech, RJ.

Izar Aximoff

Biólogo, doutor em Botânica, pós doutorando da Embrapa Agrobiologia, Seropédica, RJ.

Khadidja Dantas Rocha de Lima

Engenheira-agrônoma, doutora em Ciência do Solo, pesquisadora da Escola da Assembleia Legislativa do Rio Grande do Norte, Natal, RN.

Jeferson Luiz Dalladona Dombroski

Engenheiro-agrônomo, doutor em Botânica, professor associado da Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, RN.

José Erivaldo Araújo

Engenheiro-agrônomo, especialista em Áreas Degradadas, pesquisador da Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, RN.

Mailson Pereira de Souza

Engenheiro Florestal, doutorando em Ciências Ambientais e Florestais na Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ.

Marcelo Antoniol Fontes

Engenheiro-agrônomo, mestre em Botânica, analista da Embrapa Agrobiologia, Seropédica, RJ.

Rejane Tavares Botrel

Engenheira Florestal, doutora em Biologia Vegetal, professora associada da Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, RN.

Renan Caldas Correia

Engenheiro de Produção, mestre em Defesa e Segurança Civil, engenheiro da Mapeio Tecnologia e Engenharia, Rio de Janeiro, RJ.

APRESENTAÇÃO

A obra *Recuperação Ambiental em Áreas de Produção de Petróleo e Gás em Terra na Caatinga* consolida mais de uma década de parceria em pesquisa e desenvolvimento entre a Embrapa e a Petrobras. A Caatinga, terceiro maior bioma brasileiro, apresenta peculiaridades de manejo e convivência com a seca que conferem singularidade às atividades econômicas exercidas em seu território.

No livro, os autores apresentam experiências e conhecimentos construídos a partir da revegetação de áreas de extração de piçarra, base de poços e central de resíduos — todas impactadas pela exploração e produção de petróleo e gás em terra. As etapas do trabalho em campo e as lentes multidisciplinares que olharam essa revegetação permitiram elaborar um livro técnico, esclarecedor e ao mesmo tempo provocativo, que aponta para um futuro sustentável, fundamentado em iniciativas adaptadas à localidade. A obra permite refletir sobre os desafios técnico-científicos e sociais da revegetação das áreas, além dos impactos socioeconômicos da atividade de petróleo e gás.

Os autores fazem, ainda, considerações sobre a construção e a consolidação de políticas públicas adequadas à realidade do Semiárido, analisam as legislações vigentes e ressaltam as potencialidades de proteção e conservação de áreas naturais de Caatinga.

Por fim, retratam a importância do investimento em saber, ciência e tecnologia, conclamando a sociedade a conhecer a exuberância deste território. Desejo a todos uma boa leitura!

Cristhiane Oliveira da Graça Amâncio
Chefe-Geral da Embrapa Agrobiologia

PREFÁCIO

Este livro, fruto da parceria entre a Petrobras e a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa Agrobiologia), reúne as experiências das equipes das duas empresas na recuperação ambiental de áreas de produção de petróleo e gás em terra. A parceria começou em 2007, também com a participação da Universidade Federal Rural do Semiárido (Ufersa) e da Unidade de Operações de Exploração e Produção do Rio Grande do Norte e Ceará (UO-RNCE) da Petrobras, com o objetivo de estabelecer etapas para encerrar e revegetar jazidas de extração de piçarra.

As pesquisas realizadas nessa primeira fase resultaram na publicação do *Manual para Recuperação de Áreas Degradadas por Extração de Piçarra na Caatinga*, que serviu de base para os protocolos implantados pela empresa para a revegetação de jazidas de piçarra. Desde então, foram revegetadas dezenas de hectares de jazidas encerradas.

Em 2016, iniciou-se uma nova fase do projeto, que buscava ampliar o número de espécies recomendadas para essa situação, de difícil revegetação, além de propor alternativas de plantio que pudessem prolongar o plantio na região, normalmente limitado ao curto período em que ocorre precipitação. Nessa etapa também foram geradas soluções para a revegetação de bases de poços e centrais de resíduo com operações encerradas, além das jazidas de extração de piçarra. Obtiveram-se avanços significativos nos monitoramentos dos plantios a partir de ferramentas digitais que poderão, em futuro próximo e a partir de discussões com os órgãos ambientais, ajudar na tomada de decisão sobre o planejamento dos plantios e o momento de quitação do compromisso de recuperação da área.

Nesta obra destacamos todos os avanços citados e tecemos uma reflexão sobre a efetividade das políticas públicas existentes para conservar e recuperar áreas degradadas na Caatinga, além de alternativas de usos do solo, como plan-

tios madeireiros ou de implantação de sistemas silvipastoris, a fim de aliviar a pressão do consumo de lenha sobre a Caatinga nativa. Acreditamos que este livro será um importante marco das ações da Petrobras e da Embrapa na região, e seu conteúdo poderá apoiar ações da própria empresa ou de outras que vierem a se instalar para produzir petróleo e gás em terra, no bioma Caatinga.

Algumas discussões levantadas neste livro poderão apoiar políticas públicas ambientais nos estados, além de auxiliar a tomada de decisão de empresas, academia, ONGs e governo no que tange a restauração da Caatinga.

Boa leitura!

Alexander Silva de Resende e Guilherme Montandon Chaer
Editores Técnicos

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1

Diagnóstico socioeconômico e ambiental da atividade produtora de petróleo e gás no Rio Grande do Norte.....	11
Introdução	11
Contexto socioeconômico do Semiárido brasileiro.....	13
Contexto ambiental do Semiárido	18
A atividade de exploração de petróleo e gás no Oeste Potiguar.....	21
Ações ambientais da Petrobras no Oeste Potiguar	27
Projeto Vale Sustentável	28
Projeto Caatinga.....	32
Considerações finais.....	36
Referências	37

CAPÍTULO 2

Estratégias de recuperação ambiental de áreas de produção de petróleo e gás em terra na Caatinga	40
Introdução.....	40
Diagnóstico e etapas preliminares	43
Revegetação das áreas degradadas	51
Seleção de espécies e plantio de mudas	53
Definição de arranjos de plantio	67
Transposição de <i>topsoil</i>	70
Técnica de semeadura direta na revegetação.....	80
Nucleação para otimização da regeneração natural.....	85
Modelo de tomada de decisão.....	88
Considerações finais.....	90
Referências	91

CAPÍTULO 3

Ferramentas e indicadores de monitoramento da recuperação de áreas degradadas na Caatinga

Introdução	98
Monitoramento da qualidade do solo.....	100
Monitoramento da vegetação introduzida	103
Monitoramento da regeneração natural.....	108
Uso de drones para monitoramento da RAD	109
Obtenção da taxa de cobertura do solo com o uso de drones.....	111
Realidade virtual como ferramenta para caracterização e monitoramento de áreas degradadas e educação ambiental	113
Considerações finais.....	119
Referências	120

CAPÍTULO 4

Perspectivas para a recuperação de áreas degradadas da Caatinga

Introdução	124
A legislação ambiental e a restauração de áreas degradadas.....	125
Políticas de proteção e conservação de áreas naturais na Caatinga.....	129
Produção de energia a partir de espécies da Caatinga	133
Sistemas silvipastoris	136
Biodiversidade da Caatinga	138
Considerações finais.....	144
Referências	145

CAPÍTULO 1

DIAGNÓSTICO SOCIOECONÔMICO E AMBIENTAL DA ATIVIDADE PRODUTORA DE PETRÓLEO E GÁS NO RIO GRANDE DO NORTE

Alexander Silva de Resende | Frederico Santos Machado

Cristiano Machado Silveira | Cláudia Pavan Lamarca

José Erivaldo Araújo | Erik Gaertner Petric

Guilherme Montandon Chaer

Eduardo Francia Carneiro Campello

Introdução

Quase toda exploração e produção de petróleo e gás em terra no Rio Grande do Norte encontra-se no Oeste Potiguar, com destaque para os municípios de Mossoró, Alto do Rodrigues, Assú, Areia Branca, Pendências e Macau. Nessa região encontram-se também dezenas de jazidas minerais de piçarra, abertas para atender às demandas da construção civil e do setor de petróleo e gás. Essas jazidas tiveram as camadas superficiais do solo removidas, originando áreas que precisam de intervenção humana para serem recuperadas.

A recuperação ambiental a partir do plantio de espécies nativas é uma ciência nova. O primeiro relato no Brasil foi feito na Mata Atlântica, no Rio de Janeiro, há quase 150 anos, no atual Parque Nacional da Tijuca. O tema só ganhou escala cem anos depois, nos anos 80/90 do século passado, com o advento da imposição legal da Constituição Federal de 1988 e das repercussões da

realização, em 1992, da conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e o Desenvolvimento (Eco-92), no Rio de Janeiro (Boaventura et al., 2019). No Semiárido brasileiro, as experiências de recuperação de áreas degradadas são ainda mais recentes e, quase sempre, relacionadas à desertificação.

Sendo uma ciência nova, muito há a aprender e evoluir. Conhecer a história e as características socioeconômicas da região são premissas fundamentais para avaliar as condições hoje existentes e, assim, planejar a mitigação dos fatores que levaram à degradação.

Desde 2007, a Embrapa, em parceria com a Universidade Federal Rural do Semiárido (Ufersa) e a Petrobras, vem atuando na recuperação ambiental dessas áreas, primordialmente em jazidas de extração de piçarra, em bases de poços de exploração de petróleo já encerradas e em centrais de depósito de resíduos da perfuração desses poços. Este livro reúne parte dessas experiências de recuperação ambiental, sem a intenção de esgotá-las, mas com o objetivo de documentar e registrar ações que podem servir de suporte para projetos futuros.

Neste capítulo será feita a contextualização socioeconômica da região a partir dos dados do Censo Agropecuário (IBGE, 2017), o detalhamento da distribuição de riquezas geradas pela produção de petróleo e gás no Brasil e uma caracterização ambiental do bioma Caatinga, no qual a região do Oeste Potiguar está inserida. Especificamente, em nossa temática de trabalho será feita a caracterização das áreas degradadas durante o processo de exploração de petróleo e gás e o relato dos projetos mais recentes da Petrobras na região.

No capítulo 2 serão apresentados resultados de pesquisas realizadas na região e feitas recomendações para restauração das áreas degradadas.

No capítulo 3, serão apresentadas estratégias de monitoramento das áreas plantadas, incluindo uso de ferramentas digitais para acessar informações a partir de imagens das áreas, obtidas por drone.

Por fim, no capítulo 4 serão abordadas as perspectivas ambientais para a região.

Contexto socioeconômico do Semiárido brasileiro

Para entender o contexto social e econômico recente da zona rural brasileira, o Censo Agropecuário realizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2017) é fonte primordial de consulta. Com base nele, Fortini (2020) fez um recorte para o Semiárido, cujas informações consideradas de interesse para este estudo serão apresentadas neste tópico.

O Semiárido brasileiro possui cerca de 1,4 milhão de estabelecimentos rurais caracterizados como de agricultores familiares (79% das propriedades rurais), ocupando 50% da área agrícola da região. Os 1.171 municípios (20% dos municípios brasileiros) que fazem parte do Semiárido geram apenas 5% do Produto Interno Bruto (PIB) nacional. Esta associação permite inferir que se trata de uma das regiões de menor poder econômico do Brasil.

A taxa de analfabetismo do Semiárido é bem maior que a média brasileira e, entre agricultores familiares, chega a 40%. Para efeito comparativo, a média nacional é de 6,6%. Dezesesseis por cento dos brasileiros possuem diploma de nível superior, ante somente 1% dos agricultores familiares da região do Semiárido (Fortini, 2020). Esses números tornam evidente a associação entre baixa renda e baixa escolaridade, situação típica de um país com grande distorção social e econômica, no qual a educação se mostra tábua de salvação para ascensão das camadas menos privilegiadas.

Dos agricultores familiares, 56% têm a pecuária como principal atividade econômica, seguida de lavouras temporárias (33%). Mesmo assim, entre as culturas temporárias destacam-se aquelas destinadas à alimentação animal, como a palma e o sorgo forrageiros, seguidas das de alimentos para consumo humano, como milho, mandioca e feijão fradinho. Da produção obtida, 70% são para consumo das famílias dentro da propriedade (Fortini, 2020). Isto significa que a criação de animais é uma atividade intrínseca aos proprietários rurais

do Semiárido (Figura 1) e que boa parte dos agricultores produz somente para subsistência.



Foto: Marcelino Ribeiro

Figura 1. Ovinos diante de banco de palma forrageira.

Cerca de 13% dos estabelecimentos agropecuários declararam fazer uso de extração vegetal, sendo a lenha, basicamente para consumo próprio, o principal produto de 90% deles. Em relação a esse fato, Gioda (2019) discute a associação do aumento do valor do botijão de gás de cozinha (GLP) ao uso doméstico de lenha para a cocção de alimentos. Assim, se a renda da população é baixa e o gás GLP sobe de preço, aumenta a pressão sobre os recursos da Caatinga para o fornecimento de energia a partir da queima de biomassa para cozinhar e assim

reduzir despesas. Além da lenha, destacam-se o extrativismo do umbu e da carnaúba, que geram renda para a população rural.

Em relação à renda, 75% das famílias rurais do Semiárido declararam que outras fontes, como aposentadoria ou pensões (48%), trabalho fora da propriedade (10%), programas governamentais de transferência de renda (32%), etc. (Fortini, 2020) têm maior peso do que a renda gerada pela venda da produção agropecuária. Ainda, mais de 83% têm acesso à energia elétrica, enquanto a assistência técnica rural atende somente 10% dos agricultores familiares e 13% declararam ter tido acesso a algum tipo de financiamento, sendo o Programa Nacional de Fortalecimento da Agricultura Familiar (Pronaf) o principal meio, representando mais de 70% dos recursos governamentais recebidos. Só 1,3% dos agricultores declararam possuir trator para ajudar em suas atividades (Fortini, 2020).

Os números do Censo Agropecuário (IBGE, 2017) refletem as baixas renda, escolaridade e o baixo acesso a assistência técnica e crédito das propriedades familiares rurais no Semiárido, o que permite inferir o que deve ser feito e onde devem ser priorizadas as medidas de mitigação da pobreza. Por outro lado, nos leva a refletir: num cenário no qual as condições econômicas para sobrevivência das pessoas são abaixo das ideais, como priorizar ações de conservação ambiental? Como criticar a pressão sobre recursos florestais nativos quando estes são consumidos para a sobrevivência das pessoas? E, finalmente, o que empresas, governo e ciência podem fazer para ajudar a reverter esse cenário pouco promissor dos pontos de vista social, econômico e ambiental?

Parte das respostas a essas perguntas passa pela compreensão da necessidade de ações efetivas de responsabilidade socioambiental de empresas e governos locais, gerando e transferindo oportunidades e renda. Para tanto, no Oeste Potiguar, as empresas ligadas a exploração de petróleo e gás possuem papel fundamental.

Geração e distribuição de riqueza pela indústria do petróleo

O Brasil possui a 15ª maior reserva provada de petróleo do mundo, com 12,7 bilhões de barris (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, 2020). Considerando as Américas do Sul e Central, o País está atrás apenas da Venezuela, detentora das maiores reservas mundiais, com 303 bilhões de barris. Apesar disso, atualmente o Brasil é o maior produtor da região, com 2,8 milhões de barris por dia, ante 980 mil barris diários da Venezuela. Das reservas provadas em nosso país, 457 milhões de barris estão em terra. O Rio Grande do Norte possui a segunda maior reserva terrestre, com 119 milhões de barris, só perdendo para Sergipe, que detém 149 milhões (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, 2020).

No que tange à produção, 96% do petróleo brasileiro vêm do mar e 4%, da terra. A exploração em terra no Rio Grande do Norte (Figura 2) responde por cerca de 12 milhões dos cerca de um bilhão de barris produzidos anualmente no Brasil.



Figura 2. Rede de poços de petróleo em terra em Mossoró, RN. A noroeste, áreas de criação de camarões e de produção de sal, e a leste, agricultura.

Fonte: Google Earth (2020).

São várias as participações governamentais pagas pelos concessionários de exploração e produção de petróleo e gás natural: bônus de assinatura, *royalties*, participação especial e pagamento pela ocupação ou retenção de área Lei nº 9.478/1997 - Lei do Petróleo e suas atualizações (Brasil, 1997); Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (2020). Em 2019, o valor arrecadado com a Lei do Petróleo foi de R\$56 bilhões, sendo R\$22 bilhões em *royalties*, R\$32 bilhões de participação especial, R\$1,9 bilhão para pesquisa, desenvolvimento, inovação e formação de recursos humanos, R\$300 milhões para pagamento pela ocupação ou retenção de terra e R\$100 milhões para pagamentos aos proprietários de terra (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, 2020).

Desses recursos, R\$19 bilhões foram para os estados produtores ou confrontantes; R\$11 bilhões aos municípios produtores ou confrontantes; R\$17 bilhões ao Fundo Social; R\$2 bilhões ao fundo especial para estados e municípios; R\$1,6 bilhão ao Ministério de Minas e Energia; R\$1,3 bilhão para o Comando da Marinha; R\$1,1 bilhão para Saúde e Educação; R\$1,01 bilhão para o Ministério da Ciência e Tecnologia e R\$407,9 milhões ao Ministério do Meio Ambiente.

Do total destinado a estados e municípios em 2019, o Rio Grande do Norte obteve R\$412 milhões (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, 2020). Deve-se destacar que 1.307 proprietários rurais tiveram suas terras arrendadas para alocação de poços de petróleo (60% do total do País) no estado, por sua vez recebendo cerca de R\$14 milhões em *royalties* naquele ano (13% do total distribuído a produtores no Brasil).

Esses valores deixam claro que a indústria de petróleo, além de gerar emprego, renda e impostos localmente, distribui a riqueza gerada pela produção com estados e municípios produtores e confrontantes. Os recursos chegam de forma expressiva a proprietários rurais, passando por ministérios importantes como Saúde, Educação, Meio Ambiente, Ciência e Tecnologia e Defesa, apoiando ações da Marinha.

Além da obrigação legal, a Petrobras mantém ações de responsabilidade socioambiental a partir do seu programa Petrobras Socioambiental.

Por esses exemplos, fica claro que a missão da empresa de “*Atuar na indústria de petróleo e gás de forma ética, segura e rentável, com responsabilidade social e ambiental, fornecendo produtos adequados às necessidades dos clientes e contribuindo para o desenvolvimento do Brasil e dos países onde atua*” vem sendo cumprida. A forma como se utiliza o recurso distribuído pela indústria do petróleo certamente pode ser aperfeiçoada, mas cabe à sociedade ajudar na tomada de decisão sobre o que é prioritário.

Contexto ambiental do Semiárido

A Caatinga apresenta vegetação estacional e cobre a maior parte do clima semiárido do Nordeste (Prado, 2003). Por este motivo e por todo o trabalho relatado neste livro estar inserido nesse bioma, ele será abordado com mais detalhes neste tópico.

A Caatinga compreende 844.453 km², sendo o terceiro maior bioma brasileiro, estando presente em 70% do Nordeste e 11% do território nacional (Brasil, 2020). Está situado entre o trópico de Capricórnio e a linha do Equador, englobando os estados de Alagoas, Bahia, Ceará, Maranhão, Pernambuco, Paraíba, Rio Grande do Norte, Piauí, Sergipe e o norte de Minas Gerais. Cerca de 27 milhões de pessoas vivem nessa região (Brasil, 2020).

A latitude faz com que a intensidade luminosa seja abundante ao longo do ano. No geral, a altitude é baixa, apresentando poucos locais acima de dois mil metros, na Bahia. Isto lhe concede temperaturas altas e pouco variáveis espacial e temporalmente, apresentando médias anuais de 25 °C a 30 °C (Sampaio, 1995, 2003). Este bioma é caracterizado por índices de pluviosidade de 400 mm a 700 mm anuais, embora haja eventos de precipitação intensos, chegando a ultrapassar 100 mm em apenas um dia. A sazonalidade é irregular, com chuvas

iniciando e terminando em meses diferentes e prolongando-se por períodos incertos a cada ano (Gariglio et al., 2010).

Na Caatinga, a vegetação predominante é constituída de arbustos e árvores que, durante a seca, são decíduas. A grande maioria é provida de espinhos e/ou acúleos. São também abundantes plantas cactáceas, bromélias e herbáceas (Velloso et al., 2002). Uma característica peculiar da Caatinga está relacionada a plantas herbáceas, que só vegetam durante o período de chuvas, fazendo com que falte alimento para os animais de produção em determinado período do ano (Figura 3).



Foto: Marcelino Ribeiro

Figura 3. Caprino em área de gramíneas secas.

A ordem de solo mais comum é o Luvissole (Bautista, 1986), caracterizado por ser pouco profundo e fértil, de coloração avermelhada ou amarelada e horizonte subsuperficial mineral com incremento de argila, além de pedras e pedregulhos na superfície. É possível encontrar, de forma mais isolada, Latossolos vermelhos com horizonte B prismático nas áreas mais elevadas das depressões interplanálticas, representando a “superfície velha do sertão”. Essas diferenças, em conjunto com a disponibilidade hídrica, irão definir as tipologias da vegetação, variando entre a cactácea até a caatinga de areia (Velloso et al., 2002).

Atualmente, o bioma Caatinga possui 48% de sua cobertura original (Mapbiomas, 2020) ocupada por espécies vegetais com grande potencial forrageiro, madeireiro, frutífero, medicinal e faunístico. Em relação à fauna, abriga 178 espécies de mamíferos, 591 de aves, 177 de répteis, 79 de anfíbios, 241 de peixes e 221 de abelhas (Brasil, 2020).

É um dos biomas menos protegidos do País por unidades de conservação, com apenas 7,5% do total, sendo pouco mais de 1% enquadrado como de proteção integral. Adicionalmente, a maior parte das unidades de conservação do bioma, especialmente as Áreas de Proteção Ambiental (APAs), tem baixo nível de implementação (Brasil, 2020). Embora de pouca repercussão na mídia e na academia, a Caatinga é um bioma em franca ameaça, por ser pouco protegida por instrumentos legais específicos.

Dentro desse contexto, o uso indiscriminado de madeira, lenha e carvão, o pastejo intensivo, o fogo, o uso e o manejo sem a adoção de práticas conservacionistas das terras pela agricultura e a mineração são fatores determinantes de degradação (Oliveira-Galvão; Saito, 2003). Estes fatores, ligados à baixa precipitação, têm gerado o relato de grandes áreas desertificadas no bioma.

A atividade de exploração de petróleo e gás no Oeste Potiguar

A exploração de petróleo e gás é uma importante atividade econômica do Rio Grande do Norte. Nos últimos vinte anos, houve aumento considerável das ações na Bacia Potiguar. Acompanhando esse crescimento, a Petrobras executou obras de infraestrutura e de apoio logístico, implantando projetos de dutos de gás e óleo nos campos de exploração, em particular na região de Mossoró, onde se concentram dois grandes campos petrolíferos — Canto do Amaro e Alto da Pedra.

Em áreas de produção de petróleo e gás em terra, são três os principais tipos de áreas impactadas: jazidas para extração de piçarra, bases de poços e centrais de depósito de resíduos, detalhadas a seguir.

Jazidas de extração de piçarra

A piçarra é um material de subsolo composto principalmente por silte, areia e cascalho, usado para terraplenar novas alocações de exploração e produção de petróleo em terra, estradas de acesso, aterros, construção de barragens etc. É derivada de crostas ferruginosas ou de material sedimentar que se desenvolvem sobre diferentes estratos rochosos, sendo também empregada na construção civil, como componente de argamassa.

O processo de extração da piçarra começa com a retirada da vegetação nativa e a raspagem do horizonte superficial do solo. Em seguida, a extração é realizada em mina aberta a uma profundidade de dois a dez metros. Segundo o Decreto lei nº 97.632/89 (Brasil, 1989) ao final da extração, a área deve ser recuperada buscando o retorno do sítio degradado a uma forma de utilização de acordo com um plano pré-estabelecido para o uso do solo, visando à estabilidade do ambiente. Este entendimento legal é acertado, uma vez que, retiradas as camadas superficiais do solo, cria-se um ambiente degradado na Caatinga. Este

novo ambiente requer intervenção humana para sua restauração. Determinar quais espécies se adaptarão a essa nova situação é algo fundamental.

A revegetação dessas áreas não pode ser considerada uma simples replicação florística do que existe na Caatinga nativa adjacente. O solo, tal qual o original, já não existe mais. A drenagem foi alterada, a disponibilidade de propágulos e nutrientes, além do nível de compactação, ou seja, todas as características do substrato, foram modificados em relação ao ambiente original. Enfim, há de fato uma nova condição ambiental, que precisa ser assim entendida, para que seja possível otimizar a restauração dos mecanismos naturais da área de acordo com o que se dispõe para trabalhar.

Nessas situações, recuperar as funções do ambiente é fundamental. Retornar a cobertura e o carbono do solo e assim iniciar a ciclagem de nutrientes, criar abrigo e alimento para atrair a fauna e melhorar a capacidade de retenção de água e nutrientes pelo solo estão entre as prioridades de curto e médio prazos. A biodiversidade mais elevada tende a ser atingida numa escala de tempo um pouco maior e será tão mais facilmente alcançada quanto maior for a eficiência do retorno das funcionalidades prioritárias acima descritas.

A recuperação dessas áreas, nas quais todo o horizonte superficial (parte mais fértil do solo, rica em propágulos) foi retirado, é um desafio. A maior parte dos trabalhos tem como premissa o funcionamento de árvores como catalisadoras do processo de restauração ecológica, estruturando o ambiente. Ao plantar espécies arbóreas, processos ecológicos que sustentam o funcionamento do ecossistema e o equilíbrio ambiental dessas áreas degradadas seriam reativados, estruturando o ambiente (Resende; Chaer, 2010). Muitas vezes a introdução assistida de outras formas de vida, como cactáceas, espécies arbustivas e herbáceas, também se faz necessária, mas esse é um tema ainda pouco trabalhado e que merece mais estudos no bioma.

Outra questão a ser considerada é que a disponibilidade de água, e não a fertilidade do solo, é o principal fator limitante para o sucesso da restauração

de áreas degradadas na Caatinga. Para superar essa limitação, o momento do plantio é fundamental, assim como a escolha das espécies e o uso de técnicas que possibilitem manter a água no solo por mais tempo. Essa é uma lógica diferente da utilizada na recuperação de áreas degradadas na Amazônia ou na Mata Atlântica, ambientes nos quais a água não é tão limitante e a baixa fertilidade do subsolo tende a ser o principal obstáculo para o estabelecimento das plantas.

Uma questão intrínseca às jazidas de piçarra em cavas abertas é o fato de serem criados “lagos” ao longo do processo de exploração. Estas formações armazenam água da chuva por dado período e podem ter grande importância como reserva hídrica para dessedentação animal ou outros usos pela população local (Figura 4). Essa situação também influencia o tipo de vegetação que ali se adapta, o que pode acarretar baixa correlação entre as espécies que irão se adaptar às áreas úmidas da cava de mineração de piçarra e aquelas existentes na Caatinga nativa adjacente, tipicamente composta por espécies estacionais. Não considerar essa questão ao escolher as espécies a serem plantadas pode acarretar elevada mortalidade em projetos de recuperação.

Preservar as cavas com água é o mais correto, tendo em vista que o manejo da pecuária e a fauna nativa passarão a ter um ponto de dessedentação. O que precisa ser feito é o ordenamento topográfico da paisagem, de forma a concentrar essa água em um ou dois lagos em cada jazida, melhorando a eficácia da técnica em função do maior volume armazenado. Considerando que muitas dessas áreas estão em propriedades rurais, a situação ganha ainda mais relevância e deve ser considerada sempre que possível em programas de recuperação de áreas degradadas na Caatinga.

Excetuando-se as áreas mencionadas de armazenamento de água, o restante da jazida é ocupado por áreas planas, situadas em uma ou mais cotas, os taludes e os antigos acessos utilizados por máquinas e caminhões durante a extração da piçarra. Locais que permanecem drenados, mesmo no período de chuvas, devem ser prioritários na revegetação (Figura 4).



Figura 4. Jazida após o encerramento da extração de piçarra antes do ordenamento da paisagem.

Base de poço

Segundo dados da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustível (2020) em dezembro de 2019 havia 6.500 poços de petróleo produzindo em terra no Brasil, dos quais 3.500 no Rio Grande do Norte. Outros 4.700 poços nesse estado se encontravam em diferentes situações (Figura 5) (Fiern, 2020), muitos já com processo de produção encerrado, aguardando as etapas de recuperação da área.

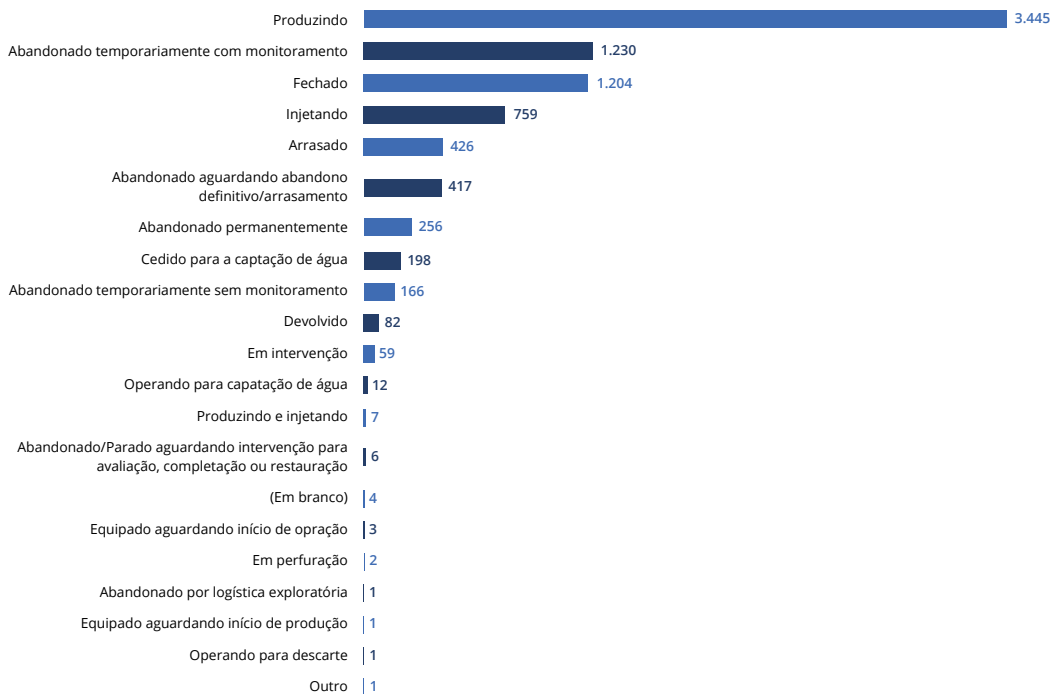


Figura 5. Número de poços de petróleo por situação no Rio Grande do Norte.

Fonte: Petróleo e Gás - Fiern (2020).

Em terra, os poços possuem de 600 m a 1.200 m de profundidade, sendo bem mais rasos que no mar. O processo de abertura de poços em terra envolve a identificação do potencial de produção pela equipe de prospecção, que em seguida demarca o ponto exato a ser perfurado. A partir desse ponto, uma segunda equipe demarca um retângulo de 66 m x 46 m, com acessos de oito metros de largura e comprimento variável em função da distância do ponto de alocação à estrada de acesso.

Após demarcada a área, um trator de esteira retira a vegetação, removendo pequena quantidade de solo superficial. Em seguida, esse mesmo trator, com auxílio dos topógrafos, aplaina a paisagem a partir da movimentação do terreno do próprio local. Depois de aplainado o terreno, a piçarra é trazida de jazidas

próximas, com o objetivo de elevar em cerca de trinta centímetros a cota final da alocação em relação ao entorno, viabilizando a instalação da sonda de perfuração. O resultado do poço em funcionamento pode ser visto através do conhecido “cavalinho”, equipamento utilizado para o bombeamento do petróleo (Figura 6).



Foto: Alexander Resende

Figura 6. Poço de petróleo em terra em funcionamento. Sistema de bombeamento (“cavalinho”) de petróleo retirando petróleo do poço, destinando-o aos oleodutos.

Após o poço ser encerrado, ou seja, quando não há mais viabilidade econômica de exploração de petróleo, ele é lacrado, os equipamentos e as barreiras de contenção são removidos e a área deve passar por um processo de descompactação e plantio de espécies nativas do bioma. Embora ocupem áreas pequenas (geralmente menor que 0,5 hectare), existem muitos poços nessa condição (Figura 5) e tantos outros que precisam ser finalizados.

Central de depósito de resíduos

As últimas das áreas a serem recuperadas pelo processo de produção de petróleo são as centrais de depósito de resíduos. São poucas áreas, com cerca de cinco hectares cada (normalmente antigas cavas de piçarra), que são impermeabilizadas para receber o material resultante da perfuração dos poços até remoção para tratamento final. Após a destinação final do material, o tanque é recoberto por camadas de piçarra, recebe solo superficial e em seguida é revegetado.

A recuperação ambiental de todas essas áreas passa por diversas fases, que vão desde o reordenamento topográfico, passando pela reintrodução de propágulos e mudas de espécies vegetais, até o monitoramento e a confirmação da recuperação funcional do ecossistema. Todas as etapas podem demandar níveis diferenciados de intervenção, o que irá depender da resiliência do sítio, do tempo disponível ou aceitável para se alcançar a recuperação e da disponibilidade financeira. Estes temas serão tratados mais detalhadamente nos próximos capítulos.

Ações ambientais da Petrobras no Oeste Potiguar

A Petrobras vem apoiando projetos ambientais e de desenvolvimento regional no Rio Grande do Norte há décadas. No que tange à recuperação de áreas degradadas no Oeste Potiguar, a empresa financiou quatro projetos nos últimos anos, dentre os quais dois com a participação da Embrapa. O primeiro envolveu uma parceria com Embrapa, Ufersa e Fundação Guimarães Duque (FGD) (2007-2010) e o segundo, com Embrapa, Fundação de Apoio à Pesquisa e ao Desenvolvimento (Faped) e o Centro de Pesquisas, Desenvolvimento e Inovação Leopoldo Américo Miguez de Mello (Cenpes) (2016-2022). Ambos atuaram na recuperação de jazidas de extração de piçarra, e o último também nas bases

de poços e centrais de resíduo, visando desenvolver e adaptar tecnologias que possam compor o protocolo operacional da empresa para esse fim.

O projeto Vale Sustentável, patrocinado pelo Programa Petrobras Socioambiental em parceria com a Associação Norte-Rio-Grandense de Engenheiros Agrônomos (2014-2017), teve como objetivo apoiar ações para a recomposição da reserva legal (RL) e de áreas de preservação permanentes (APP) de propriedades rurais de dez assentamentos rurais e, por último, o projeto Caatinga, que é uma cooperação técnica entre Ufersa, FGD e Petrobras. Iniciado em fevereiro de 2017, o projeto Caatinga objetiva gerar tecnologia e informações sobre plantas deste bioma e criar referenciais para orientar a implantação e o monitoramento de projetos de recuperação de áreas degradadas pelas atividades de exploração de petróleo e gás em terra.

Os resultados dos projetos em parceria com a Embrapa são o foco deste livro e serão detalhados nos demais capítulos. Os principais resultados dos projetos “Vale Sustentável” e “Caatinga” serão resumidos a seguir.

Projeto Vale Sustentável

O projeto atuou no Vale do Rio Assú. A degradação ambiental nessa região é fruto do intensivo uso do solo, da supressão da vegetação nativa para expansão de áreas agrícolas e/ou de pastagens e da utilização da lenha como matriz energética na indústria de cerâmica. A Associação Norte-Rio-Grandense de Engenheiros Agrônomos (Anea) foi a proponente do projeto, ao lado do Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária (Incra), do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte (IFRN), do Sindicato dos Trabalhadores Rurais de Assú e Carnaubais e das Associações Comunitárias dos Assentamentos Rurais Professor Maurício de Oliveira, Novo Pingos, Planalto, Morada do Sol, Ligação, Canto Comprido, Vassouras, Canto das Pedras, Rosa de Luxemburgo e Irmã Dorothy.

O projeto durou pouco mais de dois anos e executou inventários florestais, enriqueceu a cobertura vegetal, produziu e plantou mudas florestais e frutíferas, estimulou quintais produtivos e a educação ambiental, oferecendo cursos de formação. Entre os cursos oferecidos destacaram-se os de “conservação dos recursos naturais e práticas agrícolas sustentáveis”; “coletores de sementes nativas do bioma Caatinga” e “formação de agentes ambientais”. Foram capacitados 220 multiplicadores e foi criada a Rede de Sementes do Semiárido (Nascimento; Silva, 2015). O trabalho resultou no livro *Experiências do Projeto Vale Sustentável*. Os principais resultados do projeto são resumidos na Tabela 1.¹

Tabela 1. Principais resultados do Projeto Vale sustentável.

O que?	Como?	Quanto?	Onde?
Capacitação de multiplicadores	Três cursos	220 multiplicadores	Oeste Potiguar
Quintais agroflorestais	Distribuição de mais de sete mil mudas de 15 espécies frutíferas	Mais de 580 famílias atendidas	Assú e Carnaubais
Recuperação de APP e RL	Plantio de mudas de 32 espécies arbóreas	140 hectares e 70 mil mudas	Assentamentos: Maurício de Oliveira, Novo Pingos, Irmã Dorothy, Rosa de Luxemburgo e Margarida Alves

Quintais Produtivos

Os quintais produtivos são espaços que circundam as residências, onde são cultivados alimentos, primordialmente hortaliças e frutas. Para estimular os quintais produtivos, o projeto doou cerca de sete mil mudas de espécies frutíferas (Tabela 2) a 586 famílias residentes nos assentamentos.

¹ A íntegra pode ser encontrada em <http://projetovaluesustentavel.com.br/>

Tabela 2. Espécies frutíferas doadas às famílias assentadas.

Família	Nome Científico	Nome Popular
Malpighiaceae	<i>Malpighia puniceifolia</i> L.	Acerola
Lauraceae	<i>Persea americana</i> Mill.	Abacate
Musaceae	<i>Musa paradisiaca</i> L.	Banana
Anacardiaceae	<i>Spondias dulcis</i> Sol. ex Parkinson	Cajarana
Palmaceae	<i>Cocos nucifera</i> L.	Coco
Myrtaceae	<i>Psidium guajava</i> L.	Goiaba
Anacardiaceae	<i>Mangifera indica</i> L.	Manga
Anonaceae	<i>Anona muricata</i> L.	Graviola
Rutaceae	<i>Citrus sinensis</i> L.	Laranja
Rutaceae	<i>Citrus aurantifolia</i> Christm	Limão
Passifloraceae	<i>Passiflora edulis</i> Sims	Maracujá
Anonaceae	<i>Anona squamosa</i> L.	Pinha
Mirtaceae	<i>Eugenia michelii</i> Lam	Pitanga
Fabaceae	<i>Tamarindus indicus</i> L.	Tamarindo
Anacardiaceae	<i>Spondias tuberosa</i> Arr.	Umbuzeiro

Fonte: Nascimento e Silva (2015).

Plantio de espécies arbóreas na Caatinga

Outro trabalho desenvolvido pelo Projeto Vale Sustentável foi o plantio de 32 espécies arbóreas em 140 ha de áreas de preservação permanente e reserva legal (Tabela 3) nos assentamentos Maurício de Oliveira, Novo Pingos, Irmã Dorothy, Rosa Luxemburgo e Margarida Alves. Parte das sementes utilizadas para a produção das mudas no viveiro do IFRN veio de agricultores familiares que as coletaram após as capacitações oferecidas pelo projeto. Em média, foram plantadas 500 mudas por hectare em matas ciliares e em áreas de tabuleiros.

Tabela 3. Espécies plantadas nos assentamentos Maurício de Oliveira, Novo Pingos, Irmã Dorothy, Rosa Luxemburgo e Margarida Alves (RN).

Família	Nome Científico	Nome Popular
Fabaceae	<i>Ptyrocarpa moniliformis</i> (Benth.) Luckow & R.W.Jobson	Catanduva
	<i>Libidibia ferrea</i> (Mart. ex Tul.) L.P.Queiroz var. <i>ferrea</i>	Jucá
	<i>Calliandra spinosa</i> Ducke	Marizeiro
	<i>Bauhinia mollis</i> (Bong.) D. Dietr.	Capa-bode
	<i>Prosopis juliflora</i> (Sw) DC	Algaroba
	<i>Poincianella pyramidalis</i> (Tul.) L.P.Queiroz.	Catingueira
	<i>Mimosa tenuiflora</i> (Wild) Poir.	Jurema-preta
	<i>Parkinsonia aculeata</i> L.	Turco
	<i>Piptadenia retusa</i> P.G.Ribeiro, Seigler & Ebinger	Jurema-branca
Euphorbiaceae	<i>Bauhinia cheilantha</i> (Bong.) Steud	Mororó
	<i>Croton sonderianus</i> Muell. Arg.	Marmeleiro
	<i>Croton argyrophyllus</i> Kunth	Marmeleiro-branco
	<i>Manihot caerulescens</i> Pohl	Manicoba
	<i>Sapium glandulosum</i> (Vell.) Pax.	Burra-leiteira
Apocynaceae	<i>Jatropha molissima</i> (Pohl) Baill.	Pinhão-bravo
Apocynaceae	<i>Aspidosperma pyrifolium</i> Mart.	Pereiro
Burseraceae	<i>Commiphora leptophloeos</i> (Mart.) J.B.Gillett.	Umburana
Cactaceae	<i>Pilosocereus pachycladus</i> F.Ritter	Facheiro
Capparaceae	<i>Cynophalla hastata</i> (Jacq.) J.Presl	Feijão-bravo
Combretaceae	<i>Combretum leprosum</i> Mart.	Mufumbo
	<i>Combretum laxum</i> Jacq.	Buji
Malvaceae	<i>Pseudobombax simplicifolium</i> A. Robyns	Embiratanha
Nyctaginaceae	<i>Guapira graciliflora</i> (Mart. ex Schmidt) Lundell.	João-mole
Olacaceae	<i>Ximenia americana</i> L.	Ameixa
Arecaceae	<i>Copernicia prunifera</i> Mill.	Carnaúba
Rhamnaceae	<i>Sarcomphalus joazeiro</i> (Mart.) Hauenschild	Juazeiro
Sterculiaceae	<i>Guazuma ulmifolia</i> Lam.	Mutamba
Chrysobalanaceae	<i>Licania rigida</i> Benth	Oiticica
Mimosoideae	<i>Senegalia polyphylla</i> (DC.) Britton & Rose	Espinheiro
Nyctaginaceae	<i>Guapira graciliflora</i> (Mart. ex Schmidt) Lundell.	João-mole
Asteraceae	<i>Mikania</i> sp.	Cipó-bravo
Boraginaceae	<i>Cordia oncocalyx</i> Allemão	Pau-branco

Diagnóstico socioeconômico e ambiental

Outro material resultante do Projeto Vale Sustentável é o livro de Nascimento (2016) *Diagnóstico socioeconômico e ambiental dos assentamentos de reforma agrária atendidos pelo Projeto Vale Sustentável*. A publicação traz informações sobre a execução das atividades do projeto, abordando a organização das ações com a comunidade local, a escolha das áreas de estudo, os cursos ofertados e a metodologia adotada na recuperação das áreas degradadas.

Outra atividade desenvolvida neste trabalho foi a elaboração de inventários florestais dos assentamentos contemplados. Os inventários permitiram identificar as áreas degradadas e as espécies ameaçadas, evidenciando a composição florística da vegetação e as principais similaridades entre as áreas contempladas no projeto.

Nos municípios de Assú e Carnaubais, a Carnaúba predomina em várzeas e solos alagados. Grande parte das famílias retira seu sustento dessa espécie, por meio da fabricação de produtos como chapéus, bolsas, esteiras, balaios e vassouras. No entanto, identificou-se que essa espécie está ameaçada, em decorrência do uso frequente e do ataque de trepadeira invasora conhecida como unha-de-cão (*Cryptostegia madagascariensis* Bojer ex Decne), que sufoca e mata a Carnaúba mesmo em fase adulta.

Projeto Caatinga

Este projeto, liderado pela Ufersa, localizada em Mossoró, RN, recebeu financiamento de 2017 a 2021. Produziu informações sobre o uso de espécies em programas de recuperação de áreas degradadas, como época de coleta de sementes, localização de matrizes, armazenamento de sementes, germinação e superação de dormência, respostas à adubação, entre outros. Essas informações apoiam o protocolo de restauração florestal utilizado pela Petrobras na região.²

² Disponível em <https://projetoCaatinga.ufersa.edu.br/>.

Espécies em estudo no Projeto Caatinga

Foram obtidas informações sobre 22 espécies nativas da Caatinga utilizadas em programas de recuperação de áreas degradadas pela Petrobras, na região de Mossoró e adjacências (Tabela 4).

Tabela 4. Espécies avaliadas no projeto Caatinga.

Família	Nome científico	Nome popular
Anacardiaceae	<i>Myracrodruon urundeuva</i> Allemão,	Aroeira
	<i>Schinopsis brasiliensis</i> Engl.	Baraúna
Apocynaceae	<i>Guazuma ulmifolia</i> Lam.	Pereiro
Bignoniaceae	<i>Handroanthus impetiginosus</i> (Mart. Ex DC.) Mattos	Ipê-roxo
	<i>Tabebuia aurea</i> (Manso) Benth. & Hook. f. ex S. Moore.	Craibeira
Burseraceae	<i>Commiphora leptophloeos</i> (Mart.) J.B. Gillett.	Imburana
Capparaceae	<i>Cynophalla flexuosa</i> (L.) J. Presl	Feijão-bravo
	<i>Crateva tapia</i> L.	Trapiá
Euphorbiaceae	<i>Jatropha mollissima</i> (Pohl) Baill.	Pinhão-bravo
Fabaceae	<i>Amburana cearensis</i> (Allemão) A.C. Sm	Cumarú
	<i>Anadenanthera colubrina</i> (Vell.) Brenan	Angico
	<i>Bauhinia pentandra</i> (Bong) Vogel ex Steud.	Mororó
	<i>Cenostigma pyramidale</i> (Tul.) Gagnon & G.P.	Catingueira
	<i>Enterolobium contortisiliquum</i> (Vell.)	Orelha-de-macaco
	<i>Erythrina velutina</i> Willd.	Mulungu
	<i>Mimosa caesalpinifolia</i> Benth.	Sabiá
	<i>Mimosa ophthalmocentra</i> Mart. ex Benth.	Jurema-de-embira
	<i>Mimosa tenuiflora</i> (Mart.) Benth.	Jurema-preta
	<i>Piptadenia retusa</i> P.G.Ribeiro, Seigler & Ebinger	Jurema-branca
	<i>Senna macranthera</i> (DC. ex Collad.)	Aleluia
Malvaceae	<i>Guazuma ulmifolia</i> Lam.	Mutamba
Rhamnaceae	<i>Sarcomphalus joazeiro</i> (Mart.) Hauenschild	Juazeiro

Fonte: Projeto Caatinga.

Para algumas dessas espécies foi possível detalhar informações ligadas a seu comportamento fenológico na região (Figura 7). Essas informações são úteis e facilitam o planejamento das etapas da restauração ecológica, como a melhor época para coleta de sementes.

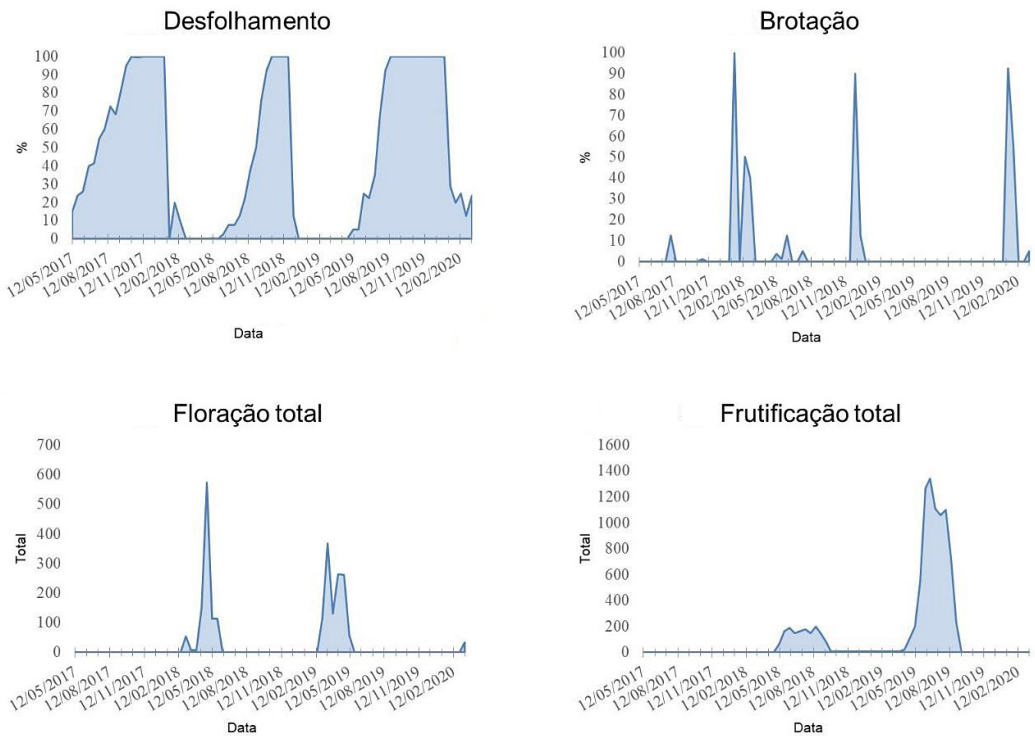


Figura 7. Acompanhamento fenológico de dez indivíduos de sabiá (*M. caesalpinifolia*) na Fazenda Experimental Rafael Fernandez, Mossoró, RN. Os gráficos indicam as épocas de desfolhamento, brotação, floração e frutificação da espécie ao longo de 33 meses.

Fonte: Projeto Caatinga.

Caatinga 360

Além das informações referentes ao processo produtivo de mudas e das capacitações, este projeto gerou um produto chamado “Caatinga 360”. São imagens fotográficas de pontos do bioma com câmeras que captam em 360 graus, nas épocas chuvosa e seca. O Caatinga 360 proporciona uma imersão de imagens e sons, possibilitando ao usuário conhecer por dentro o bioma mais dinâmico do País. Além de uma ferramenta de educação ambiental, o Caatinga 360 tem grande potencial de monitoramento de plantios ao longo do tempo.³

O projeto também formou recursos humanos, seja na capacitação de estudantes e multiplicadores, seja na formação científica de bolsistas do projeto e na organização de eventos na temática ambiental, como o VI Congresso Nordeste de Engenharia Florestal (Coneflor).

³ O produto pode ser acessado a partir do link <https://projetocaatinga.ufersa.edu.br/caatinga-360/>

Considerações finais

A ameaça da pressão demográfica à Caatinga é eminente. Em um cenário no qual as condições econômicas para sobrevivência são abaixo das ideais, maiores pressões ambientais e degradações surgirão.

A Petrobras produz petróleo na região há mais de cinco décadas. Além dos poços e de toda a rede de infraestrutura necessária para a atividade, também apoiou e desenvolveu, em parceria com outras instituições, toda a cadeia de restauração das áreas impactadas pela produção de petróleo e gás em terra. Este livro resume parte dessas ações, as quais servem de referência para a recuperação das áreas impactadas.

Entretanto, algumas questões relevantes ainda precisam ser respondidas, como a definição de parâmetros técnicos (indicadores e valores de referência) que atestem que o compromisso ambiental de recuperação da área possa ser considerado encerrado junto ao órgão ambiental. As respostas de questões como esta passam pela sistematização das informações já existentes e a normatização, por parte dos órgãos estaduais de controle ambiental, de regras que possibilitem definir parâmetros claros de sucesso a serem atingidos, de forma a permitir ajustes e melhorar a transparência de todo o processo. Um exemplo de regulamento que leva em consideração esses indicadores é a Resolução 143/2017, do Instituto Estadual do Ambiente (Instituto Estadual do Ambiente, 2017) do Rio de Janeiro, que pode ser considerado como base para essa discussão no Rio Grande do Norte, por seu caráter pioneiro.

Referências

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (Brasil). **Anuário estatístico brasileiro do petróleo, gás natural e biocombustíveis**. Rio de Janeiro, 2020. 268 p.

BAUTISTA, H. P. Espécies arbóreas da Caatinga: sua importância econômica. In: SIMPÓSIO SOBRE CAATINGA E SUA EXPLORAÇÃO RACIONAL, 1984, Feira de Santana. **Anais**. Brasília DF: EMBRAPA-DDT; Feira de Santana: Universidade Estadual de Feira de Santana, 1986. p. 117-140.

BRASIL. Presidência da República. Decreto nº 97.632, de 10 de abril de 1989. Dispõe sobre a regulamentação do artigo 2º, inciso VIII, da Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**: seção 1, p. 5571, 12 abr. 1989.

BRASIL. Presidência da República. Lei nº 9.478, de 6 de Agosto de 1997. Dispõe sobre a política energética nacional, as atividades relativas ao monopólio do petróleo, institui o Conselho Nacional de Política Energética e a Agência Nacional do Petróleo e dá outras providências. **Diário Oficial da União**: seção 1, p. 16925, 7 ago. 1997.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Biomassas**: Caatinga. Disponível em: <https://www.mma.gov.br/biomassas/caatinga>. Acesso em: 30 out. 2020.

BOAVENTURA, K. J.; CUNHA, E. L.; SILVA, S. D. Recuperação de áreas degradadas no Brasil: conceito, história e perspectivas. **Tecnia**, v. 4, n. 1, p. 124-145, 2019. Disponível em: <http://revistas.ifg.edu.br/tecnia/article/view/283>. Acesso em: 10 ago. 2021.

PETRÓLEO E GÁS - FIERN. Disponível em: <https://www.fiern.org.br/petroleo-e-gas/>. Acesso em: 26 out. 2020.

FORTINI, R. M. **Um novo retrato da agricultura familiar do semiárido 2020 nordestino brasileiro a partir dos dados do censo agropecuário 2017**. Viçosa, MG: IPPDS, UFV, 2020. 105 p. Coordenador: Marcelo José Braga.

GARIGLIO, M. A.; SAMPAIO, E. V. S. B.; CESTARO, L. A. **Uso sustentável e conservação dos recursos florestais da Caatinga**. Brasília DF: Serviço Florestal Brasileiro, 2010. 368 p.

GIODA, A. Residential fuelwood consumption in Brazil: Environmental and social implications. **Biomass and Bioenergy**, v. 120, p. 367-375, 2019. DOI: 10.1016/j.biombioe.2018.11.014.

IBGE. **Censo Agropecuário 2017: resultados definitivos**. Rio de Janeiro, 2019. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/censo-agropecuario/censo-agropecuario-2017>. Acesso em: 19 jul. 2021.

INSTITUTO ESTADUAL DO AMBIENTE (RJ). Resolução INEA nº 143, de 14 de junho de 2017. Institui o sistema estadual de monitoramento e avaliação da restauração florestal (SEMAR) e estabelece as orientações, diretrizes e critérios sobre elaboração, execução e monitoramento de projetos de restauração florestal no estado do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ: Diário Oficial do Estado, 12 jul. 2017, n. 127, p. 17-23. Disponível em: <http://www.inea.rj.gov.br/wp-content/uploads/2019/01/RESOLU%C3%87%C3%83O-INEA-N%C2%BA-143.pdf>. Acesso em: 18 out. 2021.

MAPBIOMAS. **Revelando o uso da terra no Brasil com ciência e transparência 2020**. Disponível em: https://mapbiomas.org/colecoes-mapbiomas-1?camera_set_language=pt-BR. Acesso em: 15 out. 2020.

NASCIMENTO, J. A.; SILVA, E. F. **Diagnóstico socioeconômico e ambiental dos assentamentos de reforma agrária atendidos pelo projeto Vale Sustentável**. Assu: Gráfica RN Econômico, 2016. v. 1, 128 p.

NASCIMENTO, J. A.; SILVA, E. F. **Experiências do projeto Vale Sustentável**. Assu: Gráfica RN Econômico, 2015. v. 1, 92 p.

OLIVEIRA-GALVÃO, A. L. C.; SAITO, H. C. A modelagem de dados temáticos geoespacializados na identificação dos diferentes níveis de susceptibilidade a desertificação da região Semiárida do nordeste brasileiro. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 11., 2003, Belo Horizonte. **Anais**. São José dos Campos: Inpe, 2003. p. 1399-1406.

PRADO, D. E. As caatingas da América do Sul. In: LEAL, I. R.; TABARELLI, M.; SILVA, J. M. C. (org.). **Ecologia e conservação da Caatinga**. Recife: Ed. da UFPE, 2003. p. 3-74.

RESENDE, A. S. de; CHAER G. M. **Manual para recuperação das áreas degradadas por extração de piçarra na Caatinga**. Seropédica: Embrapa Agrobiologia, 2010. 78 p.

SAMPAIO, E. V. S. B. Overview of the Brazilian caatinga. In: BULLOCK, S. H.; MOONEY, H. A.; MEDINA, E. (ed.). **Seasonally dry tropical forests**. Cambridge: Cambridge University Press, 1995. p. 35-63.

SAMPAIO, E. V. S. B. Caracterização da Caatinga e fatores ambientais que afetam a ecologia das plantas lenhosas. In: SALES, V. C. (org.). **Ecosistemas brasileiros: manejo e conservação**. Fortaleza: Expressão Gráfica e Editora, 2003. p. 129-142.

VELLOSO, A. L.; SAMPAIO, E. V. S. B.; PAREYN, F. G. C. **Ecorregiões propostas para o bioma Caatinga**. Recife: Associação Plantas do Nordeste; Instituto de Conservação Ambiental; The Nature Conservancy do Brasil, 2002. 76 p.

CAPÍTULO 2

ESTRATÉGIAS DE RECUPERAÇÃO AMBIENTAL DE ÁREAS DE PRODUÇÃO DE PETRÓLEO E GÁS EM TERRA NA CAATINGA

Guilherme Montandon Chaer | Fernando Lima Aires Gonçalves

Mailson Pereira de Souza | Felipe Ferreira da Silva

Khadidja Dantas Rocha de Lima | Cid Rodrigo Cavalcanti

Eduardo Francia Carneiro Campello | Carlos Fernando da Cunha

José Erivaldo Araújo | Marcelo Antoniol Fontes

Alexander Silva de Resende

Introdução

Os principais tipos de áreas impactadas pelas atividades de exploração de petróleo e gás natural em terra na região do semiárido brasileiro são aquelas utilizadas para extração da piçarra (jazidas) e aquelas onde a piçarra é utilizada como material de aterro ou terraplenagem em centrais de depósito de resíduos e bases de poços (Figura 1) (uma caracterização detalhada dessas áreas é apresentada no Capítulo 1 deste livro). Todas essas áreas, entretanto, possuem utilização temporária, a qual se extingue com o fim do ciclo de uso ou exploração. A partir desse momento, a área entra em descomissionamento, o que inclui as etapas de recuperação ambiental.

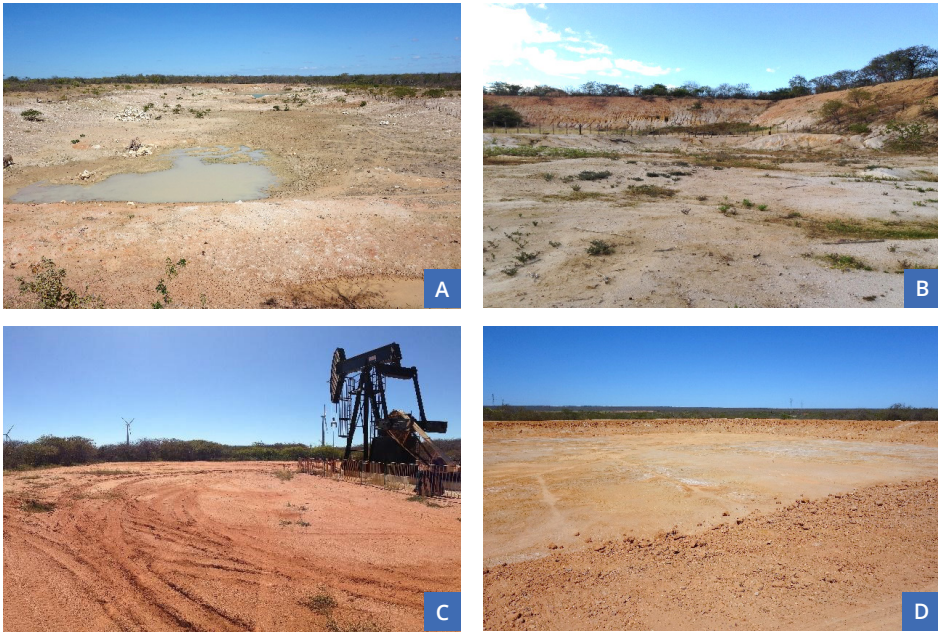


Figura 1. Principais tipos de áreas impactadas pelas atividades de exploração de petróleo e gás natural em terra na região do semiárido brasileiro: A e B – jazidas de piçarra com exploração encerrada antes das intervenções para recuperação; C – área de base de poço contendo estrutura de bombeamento de petróleo e gás em atividade; D – central de depósito de resíduos após o preenchimento da cava de depósito com piçarra.

Até o início do atual século, pouco se conhecia sobre processos e estratégias para recuperação de áreas degradadas por atividades de exploração ou uso da piçarra no bioma Caatinga. O conhecimento disponível consistia de um arcabouço de técnicas de restauração e revegetação aplicáveis a áreas severamente impactadas de regiões úmidas do País, como os biomas Amazônia e Mata Atlântica (Parrota; Knowles, 2003; Moreira, 2004; Almeida, 2006; Viani et al., 2006). No entanto, era fundamental que aquelas técnicas fossem testadas, adaptadas ou desenvolvidas na Caatinga.

As primeiras tentativas de recuperação de jazidas de piçarra foram efetuadas em pequenas áreas, com a transposição de solo superficial (*topsoil*) proveniente da abertura de novas áreas de exploração (informação pessoal, UO-RNCE). No entanto, a eficiência e a qualidade do processo eram muito variáveis e a disponibilidade de *topsoil*, limitada. Já a revegetação utilizando plantio de mudas esbarrava no desconhecimento de quais espécies nativas da região eram adaptadas ao plantio em jazidas ou demais tipos de áreas impactadas.

O primeiro estudo visando desenvolver estratégias de recuperação ambiental em áreas de exploração e produção de petróleo em terra no bioma Caatinga foi conduzido de 2007 a 2010 em seis jazidas de piçarra localizadas nos municípios de Assú, Pendências, Macau e Areia Branca, todos no Rio Grande do Norte. Os objetivos foram selecionar espécies arbóreas com capacidade de sobreviver e se desenvolver nas jazidas, avaliar a eficiência da técnica de transposição de *topsoil* e estabelecer protocolos de coleta, beneficiamento e armazenamento de sementes de espécies nativas para a produção de mudas e execução dos plantios nas jazidas. Todas essas informações foram sintetizadas no *Manual para recuperação de áreas degradadas por exploração de piçarra na Caatinga* (Resende; Chaer, 2010), o qual desde então passou a auxiliar na elaboração de termos de referência para a recuperação das áreas degradadas na região.

Após 2010, as áreas de estudo instaladas nas cinco jazidas continuaram a ser monitoradas permitindo consolidar várias informações, especialmente relativas à adaptação das espécies arbóreas (Lima, 2012; Lima et al., 2015a) e à recuperação da qualidade do substrato nas jazidas (Lima et al., 2015b, 2017; Fontes et al., 2015). Em 2016, foram iniciados mais estudos na região para aprimorar e desenvolver novas estratégias de recuperação aplicáveis às áreas degradadas. Este capítulo busca sintetizar os principais resultados, recomendações e aprendizados práticos advindos desses estudos.

Diagnóstico e etapas preliminares

Ordenamento da paisagem e preparo do solo

Anteriormente às etapas de revegetação de uma área degradada é feito um diagnóstico para avaliar e planejar as intervenções necessárias para promover a recuperação. O primeiro ponto a ser avaliado é o ordenamento da paisagem da área degradada, ação fundamental em jazidas de piçarra, onde a paisagem natural pode sofrer drásticas alterações.

O padrão de alteração da paisagem pode variar de acordo com o tipo de exploração realizado na jazida. Assim, algumas jazidas possuirão cavas rasas, onde a piçarra foi explorada em profundidade que não ultrapassa três metros em relação à cota original do terreno, resultando em uma depressão contínua e relativamente plana (Figura 2A). Essas jazidas demandam poucas intervenções na paisagem antes da revegetação. No entanto, em algumas são formadas cavas profundas, que podem ultrapassar os 15 metros, muitas vezes irregulares e normalmente acumulando água das chuvas durante um período do ano (Figura 2C). Em tais situações são necessárias intervenções na paisagem anteriormente às ações de revegetação. O ordenamento da paisagem é feito pela suavização de taludes, retificação dos fluxos de água, visando limitar processos erosivos, e pela união de pontos de acúmulo de água, de modo a formar um ou dois lagos (bacias de inundação) (Figura 2D).

Simplificadamente, a paisagem de uma jazida de piçarra após o ordenamento apresentará três componentes topográficos: bacias de inundação, taludes e áreas planas. As bacias de inundação constituem reservatórios semiperenes de água que podem vir a possuir grande utilidade durante as etapas de recuperação (como em irrigação de mudas, atração de fauna silvestre, etc.) e após a recuperação (dessedentação de animais de rebanho ou irrigação de pequenas culturas). Por essas razões, não é aconselhável que durante a etapa de ordena-

mento da paisagem sejam eliminados os pontos de acúmulo de água, sendo feita apenas sua retificação topográfica quando necessário.

Os taludes são áreas que separam a parte inundável da parte seca da jazida e aqueles existentes nas áreas de borda da jazida, separando a cava de exploração e o entorno não impactado. No ordenamento das bacias de inundação devem ser construídos taludes com inclinação de até 30°, de forma a minimizar a formação de processos erosivos e facilitar a revegetação (Figura 2D). Os taludes de borda também devem, sempre que possível, ter sua inclinação ajustada para até próximo a 30°, a fim de facilitar a revegetação. Entretanto, quando esse ajuste não for possível, os taludes de maior inclinação podem ser protegidos da erosão por meio da deposição de galharias provenientes da vegetação outrora removida da área, que geralmente é armazenada próxima ao local de exploração (Figuras 2A e 2B). Taludes com altura muito elevada (superior a três metros) devem ser retificados com a construção de terraços intermediários.



Figura 2. (A) Jazida de piçarra com cava rasa e plana. Notar ao centro da imagem a estocagem de galharia proveniente da vegetação suprimida da área. (B) Talude com deposição de galharia visando o controle da erosão. (C) Jazida de piçarra com cava profunda e irregular formando diversos pontos de inundação. (D) Cava de jazida de piçarra após a retificação de taludes e formação de bacia de inundação única.

A área plana, por sua vez, constitui toda área da jazida não classificada como talude ou bacia de inundação. Nesses locais é feita a revegetação em maior escala. Normalmente, o substrato dessas áreas apresenta-se compactado em função do trânsito de máquinas durante o processo de exploração da jazida. Situação similar ocorre em áreas de bases de poços e em centrais de depósito de resíduos. Portanto, recomenda-se que esses locais sejam subsolados a meio metro de profundidade antes do início das etapas de revegetação (Figura 3).



Figura 3. (A) Subsolação de área de central de depósito de resíduos utilizando subsolador com hastes de 50 cm. (B) Vista após a subsolação. Notar o marco de altura, no ponto central, demonstrando o quanto a cota da paisagem foi reduzida. (C) Subsolação de jazida de piçarra utilizando trator de esteira. Notar ao fundo a retroscavadeira realizando a retificação do talude para a posterior deposição de galharia.

Recomenda-se que a equipe de engenharia que atua na fase de exploração das jazidas de piçarra atue integrada à de meio ambiente, de modo a definir as melhores práticas de exploração para minimizar as intervenções necessárias e os custos para o ordenamento da paisagem durante a fase futura de recuperação.

Diagnóstico do substrato

Análises química e física da piçarra presente nas áreas a serem revegetadas são necessárias para conhecer sua fertilidade natural e a presença de restrições de ordem química ou física ao desenvolvimento vegetal. A qualidade química e física da piçarra pode ser bastante variável em razão do material de origem. Em relação à textura do substrato, apesar de composta majoritariamente por cascalho, areia e silte, os teores de argila podem variar consideravelmente entre os diferentes tipos de piçarra.

Silva et al. (2019) encontraram valores de argila variando de 6% a 29% em piçarra em quatro áreas impactadas por atividades de exploração e produção de petróleo em terra no Rio Grande do Norte (Tabela 1). Esse fato é de grande relevância para o sucesso da revegetação das áreas, uma vez que o teor de argila se correlaciona positivamente com a capacidade de o substrato armazenar água, naturalmente, um recurso valioso para plantas de ambientes semiáridos.

Tabela 1. Características químicas e físicas de amostras de piçarra (0 a 20 cm) coletadas em central de resíduos, base de poço e duas jazidas de piçarra (J1 e J2) localizadas no Rio Grande do Norte.

Área	Textura (argila%)	pH (H ₂ O)	P	K	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	N %	MO %
			mg/dm ³	cmolc/dm ³					
Central resíduos	Franca (25)	6,9	1,9	523	6,03	1,5	0,00	0,03	0,20
Base de poço	Arenosa (6)	4,9	2,0	44	0,61	0,4	0,02	0,02	0,24
J1	Arenosa (8)	8,1	9,6	126	5,52	2,4	0,00	0,01	0,20
J2	Franca (29)	4,6	1,5	138	3,86	6,2	2,26	0,06	0,44

*pH (potenciometria), P (colorimetria), K (fotometria de chama), Ca e Mg (absorção atômica), Al (titulação) e N (Kjeldahl), seguindo metodologia descrita pela Embrapa, (Claessen, 1997).

Fonte: Silva et al. (2019).

A qualidade química da piçarra também pode ser muito variável em função do material de origem. São comuns na região de exploração do Oeste Potiguar a presença de piçarreiras formadas por concreções ferruginosas, seixos de quartzo ou formações calcárias. A piçarra proveniente de áreas com concreções ferruginosas terá maior acidez e, eventualmente, presença de alumínio tóxico disponível (Al^{3+}), como é o caso da jazida J2, apresentada na Tabela 1. Piçarreiras provenientes dos demais materiais de origens tendem a possuir pH mais básico, como as analisadas na central de resíduos e na jazida J1 (Tabela 1).

Comparativamente aos solos de regiões úmidas do País, como Mata Atlântica e Amazônia, onde os solos tendem a ser mais intemperizados e de baixa fertilidade, os solos da Caatinga tendem a possuir altos teores de bases (Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^+). Esse padrão pode ser observado também nas piçarreiras caracterizadas por Silva et al. (2019) (Tabela 1). Das quatro áreas estudadas, três apresentaram teores elevados de Ca e Mg e teores de médios a altos de K. Já os teores de P podem variar de baixos a médios, enquanto os de matéria orgânica e N foram baixos. O provimento de micronutrientes pode ser igualmente relevante, especialmente em áreas com pH na faixa básica (acima de 7), situação em que vários micronutrientes podem se tornar pouco disponíveis para as plantas (Malavolta, 1979).

Algumas áreas onde são abertas jazidas de piçarra são propensas à salinização do substrato devido ao material de origem e/ou à proximidade com o mar. Solos salinos são caracterizados pela alta concentração de íons, especialmente Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ e Cl^- , e apresentam efeitos adversos sobre o crescimento das plantas (Brady; Weil, 2016). Quando o íon Na^+ predomina dentre os demais, o solo é denominado sódico e as restrições ao estabelecimento e crescimento das plantas são ainda maiores. Em solos sodificados, a ausência de estrutura (organização das partículas do solo) reduz bastante a capacidade de infiltração e drenagem da água e alguns elementos, como boro e molibdênio, além do próprio sódio, podem se acumular no sistema radicular das plantas em níveis tóxicos (Abrol et al., 1988). O grau de salinidade do substrato deve ser avaliado por meio

de medição da sua condutividade elétrica (CE) e da porcentagem de sódio trocável (PST). Convencionam-se como solos salinos aqueles com $CE > 4 \text{ dS.m}^{-1}$ e porcentagem de sódio trocável (PST) $< 15\%$ e como solos sódicos aqueles com $CE < 4 \text{ dS.m}^{-1}$ e PST $> 15\%$ (Richards, 1954).

Resende e Chaer (2010) mostraram que o plantio realizado com vinte espécies arbóreas em uma jazida de piçarra em Macau, RN, cujo substrato apresentava altos teores de sódio e taxa de infiltração inferior a 50 mm/h, resultou na mortalidade ou desenvolvimento insatisfatório de 19 das espécies plantadas. Apenas a jurema-preta (*Mimosa tenuiflora*) foi capaz de desenvolver-se satisfatoriamente (Figura 4). Portanto, o processo de recuperação de jazidas contendo substrato salino ou sódico deve ser diferenciado. Dentre as alternativas, estão a remediação da área com aplicações de gesso agrícola, o qual pode auxiliar na lixiviação dos sais (Brady; Weil, 2016), e o plantio de espécies adaptadas. A aplicação de *topsoil* também pode auxiliar na promoção da revegetação da área, mas ações devem ser tomadas para permitir a adequada drenagem das águas pluviais, evitando seu acúmulo e a salinização do próprio *topsoil* aplicado. É muito importante, nessas áreas, valorizar outras guildas, que não só as espécies arbóreas. Espécies herbáceas e arbustivas, de ocorrência espontânea, podem e devem ser otimizadas, de forma a promover a cobertura superficial do solo.



Fotos: Guilherme Montandon Chaer

Figura 4. (A) Vista de jazida de piçarra em Macau, RN com substrato contendo alta concentração de sódio. Essa área recebeu o plantio de vinte espécies arbóreas em 2008. As imagens, obtidas em junho de 2016, mostram o desenvolvimento satisfatório apenas de indivíduos arbóreos de jurema-preta (*Mimosa tenuiflora*), que se destacam ao fundo da imagem. (B) Detalhe da espécie embiratanha (*Pseudobombax marginatum*) com desenvolvimento muito limitado após oito anos do plantio.

Isolamento da área

O isolamento da área com cercas é fundamental para impedir a entrada de animais, especialmente caprinos e ovinos, muito comuns na região. Evita-se assim o pisoteio ou pastejo da vegetação introduzida ou regenerante. As cercas devem ser construídas com moirões espaçados a cada 1,0 m a 1,5 m, contendo de oito a dez fios de arame farpado (Figura 5). Igualmente importante é o monitoramento frequente do estado de conservação das cercas durante os primeiros anos após o plantio.



Figura 5. (A) Construção de cerca no entorno de área de jazida de piçarra para início do processo de revegetação. (B) Detalhe da cerca contendo oito fios de arame farpado. Notar que o espaçamento entre os fios deve ser reduzido na base da cerca. Ao fundo, detalhe de caixa de captação de águas pluviais.

Revegetação das áreas degradadas

Em geral, observa-se que áreas degradadas por extração ou deposição da piçarra na Caatinga favorecem pouco a regeneração natural, mesmo quando há presença de grandes maciços de vegetação nativa no entorno como potenciais fornecedores de propágulos. Na Figura 6 são apresentadas imagens de três jazidas de piçarra após dois e dez anos da realização da subsolagem do substrato e isolamento das áreas. É possível notar a pouca ocorrência de regeneração natural, a qual se resume a poucos indivíduos herbáceos e a alguns arbóreos nas áreas mais antigas, e a baixa taxa de cobertura do substrato. Portanto, para acelerar o processo de recuperação das áreas normalmente são necessárias intervenções por meio de introdução de vegetação.



Figura 6. Áreas de jazida de piçarra após dois anos (A) e dez anos (B e C) do isolamento da área e subsolagem do substrato. Notar a baixa colonização do substrato por plantas regenerantes.

Estudos realizados em outras regiões do País, abrangendo sobretudo os biomas Mata Atlântica e Amazônia, têm mostrado sucesso na promoção da revegetação de áreas degradadas por mineração ou remoção de horizontes superficiais por meio de diferentes estratégias, como o plantio de espécies de leguminosas arbóreas de rápido crescimento (Franco; Faria, 1997; Chaer et al., 2011), a transferência de indivíduos jovens de áreas de vegetação nativa para as áreas degradadas (Viani et al., 2006), o uso de técnicas de nucleação (Leal Filho et al., 2013) e a transposição de *topsoil* (Parrota; Knowles, 2003; Moreira, 2004; Almeida, 2006).

Entretanto, a revegetação de áreas severamente impactadas na Caatinga impõe desafios diferentes dos enfrentados em regiões úmidas do País. O mais relevante deles certamente se refere ao clima, o qual apresenta altas temperaturas durante todo o ano, forte sazonalidade de chuvas e longo período de es-

tiagem (Gariglio et al., 2010). Logo, a replicação de técnicas de recuperação de áreas degradadas já consolidadas em outros biomas pode não se adequar ao ambiente semiárido. Nos próximos tópicos são revisados os estudos realizados em áreas degradadas por exploração e produção de petróleo e gás em terra na Caatinga iniciados em 2007 e as principais recomendações existentes até então.

Seleção de espécies e plantio de mudas

O plantio de mudas de espécies nativas consiste em uma das técnicas mais amplamente utilizadas para recuperação/revegetação de áreas degradadas (Almeida, 2016). Entretanto, um aspecto crítico para o sucesso dessa técnica, sobretudo em áreas severamente degradadas, é conhecer previamente quais espécies vegetais são capazes de sobreviver e se desenvolver sob as condições inóspitas da área degradada.

Os estudos de avaliação de desempenho de espécies (geralmente arbóreas ou arbustivas) devem ser conduzidos nas próprias áreas degradadas (Resende; Chaer, 2010), testando e selecionando a maior riqueza de espécies possível. O grupo de espécies selecionadas cujas mudas serão introduzidas nas áreas degradadas deve ser capaz de restabelecer processos e funções ecológicas importantes para a recuperação da área, como cobertura e proteção do solo, aumento do carbono do solo, fixação biológica de nitrogênio, atração da fauna silvestre e promoção da regeneração natural.

Portanto, os estudos de seleção reduzem a subjetividade da escolha de espécies e, conseqüentemente, os custos do projeto, ao possibilitar a redução de atividades de replantio (dada a menor mortalidade de plantas) e do tempo de entrega da área recuperada à sociedade. Ademais, auxiliam as etapas de planejamento do plantio, como a coleta de sementes e a formação das mudas (seja em viveiro próprio ou comercial), etapa que deve ser iniciada com pelo menos seis meses de antecedência.

O primeiro estudo experimental conduzido pelo grupo para seleção de espécies arbóreas para revegetar áreas degradadas por exploração de piçarra na Caatinga foi iniciado em 2007 e envolveu o plantio de vinte espécies arbóreas em seis jazidas de piçarra nos municípios de Assú, Pendências, Macau e Areia Branca, todos no Rio Grande do Norte (Resende; Chaer, 2010; Lima, 2012; Lima et al., 2015a). Das 20 espécies avaliadas, 13 eram nativas da flora da Caatinga e outras sete eram exóticas, tendo sido incluídas no estudo como plantas de referência devido ao conhecimento prévio de seu bom desenvolvimento em áreas degradadas de outros biomas (*Gliricidia sepium*, *Pseudosamanea guachapele*, *Calliandra selloi*, *Schinus terebinthifolius*), ou da própria Caatinga (*Azadirachta indica*, *Adenanthera pavonina*). Nesse estudo, sete espécies se sobressaíram pela alta taxa de sobrevivência e crescimento, sendo cinco nativas da Caatinga: jurema-preta (*Mimosa tenuiflora*), sabiá (*Mimosa caesalpiniiifolia*), acácia-farnesiana (*Vachellia farnesiana*), pau-ferro (*Libidibia ferrea*) e caraibeira (*Tabebuia aurea*). Portanto, até aquele momento, o número de espécies nativas com informações que permitissem a recomendação para o plantio nas jazidas de piçarra ainda era muito limitado.

Um novo estudo de campo foi iniciado em 2017, abrangendo 31 espécies de hábito arbóreo ou arbustivo, todas naturalizadas ou nativas da flora da Caatinga (Gonçalves, 2020; Gonçalves et al., no prelo) (Tabela 2; Figura 7). Das 31 espécies avaliadas, 19 foram estudadas pela primeira vez, enquanto as outras 12 estiveram presentes no estudo de Lima et al. (2015a), possibilitando sua reavaliação em novas áreas.

Ensaio experimentais foram conduzidos em quatro alocações desativadas (duas jazidas de piçarra, uma área de base de poço e uma central de depósito de resíduos), nos municípios de Assú e Pendências, e envolveram o plantio de 3,4 mil mudas (27 de cada espécie por área). Os berços de plantio (30 cm de diâmetro x 40 cm de profundidade) foram dispostos no espaçamento de 2 m x 2 m e adubados com 50 g de superfosfato simples e dez gramas de FTE BR12 (coquetel

de micronutrientes composto por Mo, B, Zn, Cu e Mn) e 1,5 L de composto orgânico. Cada berço recebeu ainda 1,5 L de hidrogel hidratado (gel que absorve e retém água disponibilizando-a para o meio de forma lenta) na proporção de 6 g/L. Avaliações de sobrevivência e crescimento das espécies foram conduzidas por 24 meses.

Dezenove das 31 espécies avaliadas apresentaram taxa de sobrevivência superior a 70% após 24 meses, com destaque para a orelha-de-macaco (*Enterolobium timbouva*), o ipê-roxo (*Handroanthus impetiginosus*), o pinhão-manso (*Jatropha curcas*), o sabiá (*M. caesalpiniiifolia*), o monjoleiro (*Mimosa schomburgkii*), a jurema-preta (*M. tenuiflora*) e a caraibeira (*Tabebuia aurea*), todas com taxa de sobrevivência igual ou maior a 95% (Tabela 2). Apenas nove espécies apresentaram taxas de sobrevivência inferiores a 50%, entre elas o mulungu (*Erythrina velutina*), o cajueiro (*Anacardium occidentale*), o mororó (*Bauhinia cheilantha*) e a canafistula (*Peltophorum dubium*), que apresentaram taxas de 20% a 30% (Tabela 2).

Apenas 12 das 31 espécies atingiram mais de 1 m de altura 24 meses após o plantio (taxa de crescimento em altura superior a 4 cm/mês – Tabela 2), especialmente aquelas do gênero *Mimosa*, como o sabiá (*M. caesalpiniiifolia*), a jurema-preta (*M. tenuiflora*) e o monjoleiro (*M. schomburgkii*), que atingiram alturas de 1,6 m a 2 m. No outro extremo, nove espécies não passaram de 50 cm de altura 24 meses após o plantio, a exemplo do pereiro (*Aspidosperma pyrifolium*), do cumaru (*Amburana cearenses*), da embiratanha (*Pseudobombax marginatum*) e do jatobá (*Hymenaea courbaril*), apresentando taxas de crescimento em altura menores que 1,5 cm/mês (Tabela 2).

Tabela 2. Taxas médias de crescimento em altura, área de copa e de sobrevivência de 31 espécies florestais nativas ou naturalizadas da Caatinga 24 meses após o plantio em áreas degradadas por atividades de exploração e produção de petróleo e gás natural em terra nos municípios de Assú e Pendências, RN.

Espécie	Nome comum	Crescimento em altura	Área de copa	Taxa de sobrevivência
		cm/mês	m ²	%
<i>Astronium urundeuva</i> (M.Allemão) Engl. ⁽¹⁾	Aroeira	1,73	0,78	85
<i>Amburana cearensis</i> (Alle-mão) A.C.Sm. ⁽¹⁾	Cumarú	1,50	0,27	43
<i>Anacardium occidentale</i> L.	Cajueiro	4,01	1,19	25
<i>Anadenanthera colubrina</i> (Vell.) Brenan	Angico-vermelho	2,32	0,39	65
<i>Aspidosperma pyrifolium</i> Mart. & Zucc. ⁽¹⁾	Pereiro	1,51	0,22	83
<i>Bauhinia cheilantha</i> (Bong.) Steud.	Mororó	1,64	0,23	27
<i>Cenostigma pyramidale</i> (Tul.) Gagnon & G.P.Lewis ⁽¹⁾	Catingueira	1,70	0,48	70
<i>Cereus jamacaru</i> DC	Mandacaru	4,42	0,07	75
<i>Copernicia prunifera</i> (Mill.) H.E.Moore	Carnaúba	2,32	0,31	92
<i>Enterolobium timbouva</i> Mart. ⁽¹⁾	Orelha-de-macaco	4,80	1,00	95
<i>Erythrina velutina</i> Willd.	Mulungu	2,69	0,62	20
<i>Handroanthus impetiginosus</i> (Mart. ex DC.) Mattos ⁽¹⁾	Ipê-roxo	3,21	0,48	96
<i>Hymenaea courbaril</i> L.	Jatobá	0,68	0,44	40
<i>Jatropha curcas</i> L.	Pinhão-mansó	4,10	0,55	96
<i>Libidibia ferrea</i> (Mart. ex Tul.) L.P.Queiroz ⁽¹⁾⁽⁺⁾	Pau-ferro	4,21	1,04	81
<i>Microdesmia rigida</i> (Benth.) Sothers & Prance	Oiticica	4,26	1,02	63
<i>Mimosa caesalpinifolia</i> Benth. ⁽¹⁾⁽⁺⁾	Sabiá	8,24	6,06	97
<i>Mimosa laticifera</i> Rizzini & A.Mattos	Jurema-de-espinho	4,03	1,12	37

Continua...

Tabela 2. Continuação.

Espécie	Nome comum	Crescimento em altura	Área de copa	Taxa de sobrevivência
		cm/mês	m ²	%
<i>Mimosa schomburgkii</i> Benth. ⁽¹⁾	Monjoleiro	8,42	3,55	95
<i>Mimosa tenuiflora</i> (Willd.) Poir. ^{(1)(*)}	Jurema-preta	6,49	9,23	95
<i>Parkinsonia aculeata</i> L. ⁽¹⁾	Turco	3,94	1,89	80
<i>Peltophorum dubium</i> (Spreng.) Taub.	Canafistula	5,67	0,78	30
<i>Piptadenia retusa</i> P.G.Ribeiro, Seigler & Ebinger	Jurema-branca	5,16	4,35	81
<i>Pityrocarpa moniliformis</i> (Benth.) Luckow & R.W. Jobson	Catanduva	5,33	1,35	49
<i>Pseudobombax marginatum</i> (A.St.-Hil., Juss. & Cambess.) A.Robyns	Embiratanha	0,47	-	85
<i>Sarcomphalus joazeiro</i> (Mart.) Hauenschild	Juazeiro	3,97	0,38	88
<i>Senegalia polyphylla</i> (DC.) Britton & Rose	Unha-de-gato	5,03	3,13	64
<i>Senna spectabilis</i> (DC.) H.S.Irwin & Barneby	Cássia-do-nordeste	1,99	0,68	50
<i>Spondias tuberosa</i> Arruda	Umbu	2,07	0,54	86
<i>Tabebuia aurea</i> (Silva Manso) Benth. & Hook.f. ex S.Moore ^{(1)(*)}	Caraibeira	4,73	0,37	100
<i>Triplaris gardneriana</i> Wedd.	Pajeu	2,81	1,05	86

⁽¹⁾ Espécies avaliadas por Lima et al. (2015a) em cinco jazidas de piçarra do Rio Grande do Norte.

^(*) Espécies recomendadas por Lima et al. (2015a).

Fonte: Gonçalves (2020).



Figura 7. (A) Sabiá (*M. caesalpinifolia*), (B) caraibeira (*T. aurea*); (C) jurema-preta (*M. tenuiflora*), (D) cajueiro (*A. occidentale*), (E) ipê-roxo (*H. impetiginosus*) e (F) monjoleiro (*M. schomburgkii*) em experimento de seleção de espécies cerca de 12 meses após o plantio (Pendências, RN).

Outra variável relevante de crescimento para a avaliação das espécies arbóreas é a área de copa. Espécies que produzem copas amplas e densas são mais eficazes em amenizar o efeito erosivo de chuvas, e o sombreamento produzido por elas pode facilitar a recolonização do ambiente por outras formas de vida, devido ao aumento da umidade do ar, à diminuição da temperatura e à redução da perda de água do solo por evaporação (Jennings et al., 1999). No ensaio experimental descrito, houve grande variação de tamanho de copa entre as espécies arbóreas. Das 30 avaliadas (excluindo a cactácea *Cereus jamacaru*), 58% apresentaram copas inferiores a 1 m², 26% entre 1 m² a 2 m² e 16%, copas maiores que 2 m², 24 meses após o plantio (Tabela 2). Como no crescimento em altura, destacaram-se as espécies do gênero *Mimosa* (jurema-preta, sabiá e monjoleiro), em adição à jurema-branca (*Piptadenia retusa*) e à unha-de-gato (*Senegalia polyphylla*), todas com áreas de copa entre 5 m² e 8,5 m², 24 meses após o plantio (Tabela 2).

Muitas espécies arbóreas da flora da Caatinga iniciam a abertura de copa a alguns centímetros do solo. Entre as que apresentam essa característica, destacam-se as da família Leguminosae, principalmente as capazes de fixar biologicamente o nitrogênio atmosférico quando em simbiose com bactérias genericamente chamadas de rizóbios (Franco; Faria, 1997). Podem ser citadas como exemplos a jurema-preta (*M. tenuiflora*), a jurema-branca (*P. retusa*) e o sabiá (*M. caesalpinifolia*) (Figuras 7 e 8). A fixação biológica de nitrogênio e a capacidade de associação com micorrizas arbusculares conferem a essas espécies adaptabilidade e potencial de crescimento em áreas degradadas (Chaer et al., 2011). Em razão desses fatores, possuem boa capacidade de produção de biomassa e de recobrimento do solo, sendo boas formadoras de serapilheira, especialmente em razão da perda de folhas durante a estação seca (Figura 8). Portanto, é recomendável que essas espécies não falem na lista de espécies a serem utilizadas quando a revegetação for efetuada por meio do plantio de mudas.



Figura 8. Formação de serapilheira sob aleias de árvores de (A) jurema-preta (*M. tenuiflora*) e (B) sabiá (*M. caesalpinifolia*) crescendo em áreas degradadas com piçarra na Caatinga. Imagens obtidas durante a estação seca do ano, quando ambas as espécies (caducifólias) perdem grande parte das folhas.

Diferentemente, espécies como caraibeira (*Tabebuia aurea*), ipê-roxo (*Handroanthus impertiginosus*), pau-ferro (*Libidibia ferrea*), oiticica (*Microdesmia rigida*) e canafistula (*Peltophorum dubium*) privilegiam inicialmente o crescimento em altura para, apenas em estágios mais avançados de desenvolvimento, formarem copas amplas (Figuras 7B, E).

Outras espécies de crescimento mais lento em parte aérea, podem assim fazê-lo por priorizar o armazenamento dos fotoassimilados em estruturas de reserva, a exemplo de xilopódios presentes nas raízes de angico-vermelho (*A. colubrina*), cumaru (*Amburana cearenses*) (Ramos et al., 2014) e umbu (*Spondias tuberosa*) (Cavalcanti; Resende, 2006). Sendo assim, os critérios de seleção de espécies devem, sempre que possível, ir além de medidas de crescimento, considerando também aspectos funcionais e ecológicos.

Os resultados dos estudos de seleção de espécies de Lima et al. (2015a) e Gonçalves (2020) restringiram-se a um período de cerca de dois anos de avaliação. Apesar desse período ser suficiente para indicar o grau de adaptabilidade da espécie à área degradada, é importante que o monitoramento prossiga. Não

é incomum na Caatinga a ocorrência de vários anos consecutivos com pluviosidade abaixo da média histórica, levando a situações de estresse hídrico de tal magnitude que determinadas espécies, mesmo nativas do bioma, podem não ser capazes de se desenvolver nas áreas degradadas. Por exemplo, no estudo de seleção de espécies iniciado em 2007, o mulungu (*Eritrina velutina*) apresentava 88% de taxa de sobrevivência dois anos após o plantio (Resende; Chaer, 2010; Lima et al., 2015a). Em nova avaliação de campo realizada em 2017, ou seja, cerca de dez anos após o plantio, verificou-se que praticamente todas as plantas estavam mortas (dados não publicados), possivelmente em razão de uma sequência de anos anteriores atipicamente secos. Em situações como essa, espécies capazes de produzir estruturas anatômicas específicas de suporte ao déficit hídrico, como o armazenamento de água e nutrientes no caule da paineira-branca (ou barriguda, *Ceiba glaziovii*), nas partes verdes das cactáceas (mandacaru, facheiro, xique-xique, coroa-de-frade) ou em xilopódios, conforme anteriormente citado, possuirão capacidade excepcional de resistência a períodos de forte déficit hídrico.

Ao contrário, anos com pluviosidade acima da média podem levar a acúmulo de água em superfície, especialmente em jazidas de piçarra, cujo terreno, muitas vezes compactado e em cotas mais baixas que o entorno, não consegue drenar rapidamente as águas das chuvas. Isso pode levar à mortalidade de espécies sensíveis a alagamentos, principalmente quando estes perduram por períodos relativamente longos (um ou mais meses). Tal fato ocorreu em uma das jazidas estudadas por Gonçalves (2020). Por volta de 36 meses após o plantio, um alagamento temporário levou à mortalidade de 100% das plantas de angico-vermelho (*Anadenanthera colubrina*), que até então vinham apresentando bom desenvolvimento (Figura 9). Várias outras espécies também sentiram o impacto do alagamento, apresentando amarelecimento e perda de folhas, mas após a drenagem do terreno retomaram o ritmo normal de crescimento.



Figura 9. Alagamento de parte da área de jazida de piçarra utilizada no estudo de seleção de espécies (Gonçalves, 2020). O alagamento, devido ao excesso de chuvas nos meses de abril e maio de 2019, perdurou por cerca de 45 dias, causando danos a espécies sensíveis, a exemplo do angico-vermelho (*A. colubrina*) (Pendências, RN).

Classificação de aptidão das espécies arbóreas

Apesar dos principais aspectos utilizados para a seleção de espécies para plantio nas áreas degradadas estarem relacionados a sobrevivência e crescimento nestas condições, outros também devem ser considerados. Como exemplo, pode ser considerada a prioridade de conservação da espécie para a região ou bioma e a presença de atributos ecológicos e funcionais desejáveis ou que possam contribuir para recuperar o ambiente. Nesse sentido, Gonçalves (2020) propôs um sistema de classificação de aptidão com base em um índice denominado Valor de Conservação e Restauração (VCR). O VCR é obtido com base em dois subíndices. O primeiro, denominado Valor de Restauração (VR), atribui uma nota à espécie com base em informações de desempenho em crescimento (área de copa e altura) e em sobrevivência. O segundo, denominado Valor de Conservação (VC) (modificado de Brancalion et al., 2015), atribui nota à espécie com base em seu grau de importância para a conservação do ambiente em

que será introduzida, considerando status de conservação, raridade, endemismo e facilidade de dispersão, baseada no tamanho das sementes produzidas. A nota do VCR é então obtida pela média de VR e VC. As notas são categorizadas em quatro classes de aptidão relativas ao conjunto de espécies avaliadas: baixa aptidão (nota < média, menos um desvio padrão); média aptidão (nota < média, até menos um desvio padrão); alta aptidão (nota > média, até mais um desvio padrão) e muito alta (nota > média, superior a mais um desvio padrão).

A Tabela 3 apresenta as 31 espécies avaliadas por Gonçalves (2020), listadas da maior para a menor classe de aptidão, com base no VCR. Das 31 espécies, 16% (cinco) foram classificadas com baixa aptidão, 32% (dez), com média, 35% (11), com alta e 16% (cinco), com muito alta aptidão para uso na recuperação de áreas impactadas pela exploração e produção de petróleo e gás em terra, no bioma Caatinga. As espécies classificadas no nível mais alto de aptidão foram pinhão-manso (*J. curcas*), sabiá (*M. caesalpiniifolia*), jurema-branca (*P. retusa*), monjoleiro (*M. schomburgkii*) e juazeiro (*Sarcomphalus joazeiro*), enquanto as classificadas com baixa aptidão foram mulungu (*E. velutina*), catanduva (*Pityrocarpa moniliformis*), mororó (*B. cheilantha*), pereiro (*A. pyrifolium*) e catingueira (*Cenostigma pyramidale*).

Tabela 3. Classes de aptidão para conservação (VC), restauração (VR) e conservação e restauração (VCR) obtidas para 31 espécies testadas em áreas degradadas por atividades de exploração e produção de petróleo e gás em terra na Caatinga. As espécies foram ordenadas da classe de aptidão mais alta para a menor VCR.

Espécie	Nome comum	Aptidão VC	Aptidão VR	Aptidão VCR
<i>Jatropha curcas</i>	Pinhão-manso	Muito alta	Alta	Muito alta
<i>Mimosa caesalpinifolia</i> ⁽¹⁾⁽⁺⁾	Sabiá	Média	Muito alta	Muito alta
<i>Piptadenia retusa</i>	Jurema-branca	Alta	Muito alta	Muito alta
<i>Mimosa schomburgkii</i> ⁽¹⁾	Monjoleiro	Média	Muito alta	Muito alta
<i>Sarcomphalus joazeiro</i>	Juazeiro	Muito alta	Alta	Muito alta
<i>Microdesmia rígida</i>	Oiticica	Muito alta	Média	Alta
<i>Mimosa tenuiflora</i> ⁽¹⁾⁽⁺⁾	Jurema-preta	Baixa	Muito alta	Alta
<i>Parkinsonia aculeata</i> ⁽¹⁾	Turco	Média	Alta	Alta
<i>Tabebuia aurea</i> ⁽¹⁾⁽⁺⁾	Caraibeira	Média	Alta	Alta
<i>Enterolobium timbouva</i> ⁽¹⁾	Orelha-de-macaco	Alta	Alta	Alta
<i>Copernicia prunifera</i>	Carnaúba	Muito Alta	Média	Alta
<i>Spodias tuberosa</i>	Umbu	Muito Alta	Média	Alta
<i>Handroanthus impetiginosus</i> ⁽¹⁾	Ipê-roxo	Média	Alta	Alta
<i>Libidibia ferrea</i> ⁽¹⁾⁽⁺⁾	Pau-ferro	Média	Alta	Alta
<i>Senegalia polyphylla</i>	Unha-de-gato	Média	Alta	Alta
<i>Anacardium occidentale</i>	Cajueiro	Muito Alta	Média	Alta
<i>Cereus jamacaru</i>	Mandacaru	Média	Alta	Média
<i>Peltophorum dubium</i>	Canafístula	Média	Alta	Média
<i>Triplaris gardneriana</i>	Pajeu	Média	Média	Média
<i>Anadenanthera colubrina</i>	Angico-vermelho	Média	Média	Média
<i>Pseudobombax marginatum</i>	Embiratanha	Média	Média	Média
<i>Hymenaea courbaril</i>	Jatobá	Muito Alta	Baixa	Média
<i>Mimosa laticifera</i>	Jurema-de-espinho	Média	Média	Média
<i>Astronium urundeuva</i> ⁽¹⁾	Aroeira	Média	Média	Média
<i>Senna spectabilis</i>	Cássia-do-nordeste	Média	Média	Média
<i>Amburana cearenses</i> ⁽¹⁾	Cumarú	Alta	Baixa	Média
<i>Erythrina velutina</i> ⁽¹⁾	Mulungu	Média	Baixa	Baixa
<i>Pityrocarpa moniliformis</i>	Catanduva	Baixa	Média	Baixa
<i>Bauhinia cheilantha</i>	Mororó	Média	Baixa	Baixa
<i>Aspidosperma pyriformis</i> ⁽¹⁾	Pereiro	Baixa	Média	Baixa
<i>Cenostigma pyramidale</i> ⁽¹⁾	Catingueira	Baixa	Baixa	Baixa

⁽¹⁾ Espécies avaliadas por Lima et al. (2015a) em cinco jazidas de piçarra do Rio Grande do Norte.

⁽⁺⁾ Espécies recomendadas por Lima et al. (2015a).

Fonte: Gonçalves (2020).

Comparando os resultados de desempenho (crescimento e sobrevivência) das espécies, apresentados na Tabela 2, com a classificação de aptidão da Tabela 3, observa-se que o critério de aptidão VCR dá maior peso a espécies que seriam menos priorizadas apenas por critérios de desempenho em campo. Por exemplo, *A. occidentale* e *S. tuberosa* foram classificadas como raras na região e apresentam sementes grandes e de difícil dispersão, fatos que resultaram em uma classificação de aptidão VC muito alta. Logo, apesar de essas espécies apresentarem desempenho de crescimento e sobrevivência intermediários (Tabela 2), receberam uma classificação de aptidão VCR alta (Tabela 3).

Outro exemplo interessante é o da catingueira (*C. pyramidale*), espécie comumente encontrada nos remanescentes florestais da Caatinga da região do estudo e que apresenta grande capacidade de produção de sementes e não é endêmica ao bioma. Como esta espécie também apresentou baixo desempenho (especialmente em crescimento) nas áreas degradadas, foi classificada com aptidão VCR baixa (Tabela 3). Da mesma forma que a catingueira, a jurema-preta (*M. tenuiflora*) é comumente encontrada na Caatinga, sendo pioneira na colonização de áreas degradadas, e, por essas razões, não apresenta grande importância do ponto de vista de conservação. No entanto, apresenta crescimento excepcional nas áreas degradadas, o que a coloca no mais alto nível de aptidão para restauração. A ponderação de ambas as características (aptidão para conservação baixa e para restauração muito alta) a coloca na classe de aptidão VCR alta (Tabela 3).

Vale destacar que as espécies classificadas com aptidão VCR baixa não devem necessariamente ser descartadas de projetos de recuperação de áreas degradadas por atividades de exploração e produção de petróleo e gás em terra na Caatinga. É preciso comprovar sua capacidade de se perpetuar na área em longo prazo. No entanto, a utilização de espécies com VCR baixo deve ser mais criteriosa, seja porque apresentaram baixas taxas de sobrevivência ou de crescimento, seja porque são comuns na região, possuindo maior probabilidade de colonizar a área por meios naturais ao longo do tempo. Assim, o projeto de reve-

getação pode, por exemplo, utilizar a classificação de aptidão VCR para definir densidades de plantio diferenciadas para cada espécie ou grupo de espécies, adotando maiores densidades de plantio para aquelas com maior classe de aptidão e vice-versa. Isto pode ajudar a garantir maior eficácia (revegetação mais rápida da área e com níveis satisfatórios de diversidade) e menores custos (redução de atividades de replantio e menor tempo de revegetação) no processo de recuperação das áreas degradadas da Caatinga.

Em situações em que for possível fazer plantios escalonados no tempo, as classificações de aptidão VR, VC e VCR podem ser utilizados para definir as espécies de cada etapa de plantio. Para o plantio inicial, podem ser utilizadas apenas espécies com aptidão VR ou VCR alta e muito alta, ou seja, com alto potencial de estabelecimento e crescimento e, assim, consideradas estruturantes de ambiente. Após alguns anos, à medida que as condições de substrato e microclima da área se tornem mais favoráveis em função do desenvolvimento das primeiras espécies plantadas, pode-se realizar o enriquecimento da área com espécies de maior aptidão VC e baixa aptidão VR, as quais, sob condições menos restritivas, possivelmente terão maior probabilidade de sucesso de estabelecimento e desenvolvimento. Essa é uma boa oportunidade de pesquisa, visando avaliar a eficácia dessa proposta em campo.

Apesar do sistema de classificação VCR representar um avanço em relação ao critério único de desempenho para selecionar espécies para revegetar áreas degradadas, por meio de incorporação de critérios relacionados à conservação da espécie na região, é importante frisar que o sistema ainda não considera características funcionais de cada espécie. Estas, como discutido em tópicos anteriores, podem ser relevantes em diferentes situações (por exemplo, resistência a déficits hídricos prolongados, situações de alagamento ou de substratos salinizados). Desse modo, há espaço para aperfeiçoar o método de classificação proposto por Gonçalves (2020), de modo a agrupar mais informações para auxiliar nas tomadas de decisão para selecionar as espécies a serem usadas na revegetação das áreas degradadas.

Definição de arranjos de plantio

Um arranjo de plantio refere-se ao conjunto de espécies e a sua distribuição espacial (densidade e posição relativa) na área a ser revegetada por meio de mudas. Inúmeros arranjos podem ser definidos, considerando diferentes conjuntos de espécies, densidades e distribuição espacial. Como regra geral, os plantios devem ser realizados de forma a promover o mais rápido recobrimento da área com vegetação, mas ainda mantendo uma alta diversidade, a fim de restabelecer processos ecológicos e de elementos estruturais típicos da vegetação natural da região.

Com o objetivo de avaliar arranjos de plantio para revegetar uma jazida de piçarra no Rio Grande do Norte, Gonçalves (2020) comparou plantios multiespecíficos com duas densidades de jurema-preta (*M. tenuiflora*) e jurema-branca (*P. retusa*), ambas leguminosas arbóreas de rápido crescimento. O primeiro tratamento (T1) constituiu em um controle, sem plantio. No segundo tratamento (T2) foram plantadas 11 espécies (as duas juremas, angico-vermelho, aroeira, umbu, cajueiro, pau-ferro, unha-de-gato, jurema-de-espinho, caraibeira e sabiá) em proporções iguais e em posições aleatórias. Em um terceiro tratamento (T3) foram plantadas sete espécies (as duas juremas, angico-vermelho, umbu, pau-ferro, caraibeira e sabiá), mas com as duas juremas perfazendo 50% do total de plantas, distribuídas em linhas alternadas com linhas das outras cinco espécies (Figura 10B). O quarto tratamento (T4) é uma repetição do segundo, mas com as copas das duas juremas sofrendo podas de 50% da área anualmente, a partir do segundo ano após o plantio (Figura 10B). A poda teve como finalidade estimular o crescimento das demais espécies via abertura de luz e fertilização do solo pela deposição da biomassa proveniente das podas nas entrelinhas. Em todos os plantios foi adotado espaçamento de 2 m x 2 m.

Após 53 meses, as imagens aéreas obtidas por drone permitiram observar que mais de 75% da área de cobertura dos três tratamentos estiveram associados à copa de apenas três espécies: jurema-branca, jurema-preta e sabiá, in-

cluindo o tratamento onde as linhas de juremas sofreram podas anuais (Figura 10). Esse resultado condiz com a rápida formação de copa por essas três espécies (Tabela 2) e indicou que as demais tiveram pouca relevância para o fechamento do dossel até aquele momento.



Fotos: Fernando Lima Aires Gonçalves



Figura 10. Vista dos tratamentos onde as linhas formadas por jurema-preta e jurema-branca sofreram podas anualmente (A) ou não sofreram podas (B). (C) Vista aérea dos quatro tratamentos implantados. A área controle (sem plantio) corresponde à área sem vegetação no canto inferior esquerdo da imagem (notar o baixo potencial de regeneração natural da área). Imagens obtidas aos 53 meses após o plantio.

O manejo de podas das juremas não se mostrou relevante para promover o crescimento das demais espécies. Em T2, várias das espécies de crescimento mais lento apresentaram aspectos relacionados a estiolamento causado pela busca por luz, em razão do sombreamento proporcionado pelo dossel das juremas e do sabiá.

Em T3, a alta densidade das espécies de rápido crescimento e a não realização das podas anuais ocasionou um fechamento intenso do dossel, a ponto de inviabilizar as tomadas de medidas de crescimento das demais espécies ao final do período de monitoramento. Entretanto, visualmente notou-se uma forte dominância das copas das juremas e do sabiá sobre as das demais espécies, com aparente prejuízo ao crescimento destas. Apesar da forte dominância das espécies de rápido crescimento, houve baixa mortalidade nos plantios, com taxas de sobrevivência acima de 80% (exceto o angico e o cajueiro no tratamento T2).

O acompanhamento em longo prazo desse estudo poderá responder se as espécies de crescimento mais lento conseguirão competir e prosperar nessas condições ou irão perecer, restando apenas as juremas e o sabiá como plantas dominantes na área. Idealmente, deve-se conciliar a introdução de um maior número possível de espécies adaptadas e com funcionalidades diversificadas, com uma densidade adequada de espécies de rápido crescimento que promova o recobrimento da área degradada, porém sem interferir no desenvolvimento das demais espécies, de crescimento mais lento, ou mesmo a expressão da regeneração natural no sítio.

Por fim, é interessante notar a ausência de vegetação recobrando o substrato no tratamento controle (Figura 10). Isto ocorreu mesmo com a área experimental estando circundada por um grande maciço de vegetação nativa, fato insuficiente para promover a regeneração mesmo três anos após o preparo e o isolamento da área.

Transposição de *topsoil*

O *topsoil* constitui a camada de solo superficial removido por raspagem por meio de máquinas durante o processo de remoção da vegetação natural para abertura de locais operacionais, como jazidas, bases de poços e estradas de acesso. Portanto, o *topsoil* compreende a camada do solo mais rica em matéria orgânica, nutrientes e, especialmente, sementes, sendo um recurso valioso para revegetar áreas degradadas (Carrick; Kruger, 2007; Scoles-Sciulla; Defalco, 2009). Além disso, essa camada de solo contém fungos, bactérias simbióticas e outros microrganismos promotores de crescimento vegetal autóctone que facilitam o estabelecimento das plantas na área degradada (Bell et al., 2003; Jasper, 2007; Pilon et al., 2018; Silva et al., 2019).

Quando o *topsoil* é transposto para uma área degradada que teve seus horizontes superficiais removidos ou soterrados, pode funcionar como um importante auxiliar no processo de revegetação e recuperação. Diversos estudos evidenciam o sucesso do uso do *topsoil* como técnica de restauração florestal em áreas severamente impactadas pela remoção dos horizontes superficiais do solo (Parrota; Knowles, 2003; Moreira, 2004; Almeida, 2006; Viani et al., 2006; Santos, 2010; Leal Filho et al., 2013; Dias, 2017). No entanto, esses estudos foram realizados em regiões úmidas e com características distintas da Caatinga. Nos tópicos abaixo serão abordados aspectos que devem balizar o uso do *topsoil* em áreas degradadas por exploração e produção de petróleo e gás em terra, na Caatinga, tendo como base a experiência obtida em estudos controlados e em observações de campo.

Operações de aplicação e distribuição de *topsoil*

A opção pelo uso do *topsoil* dependerá de dois fatores: a disponibilidade de material e a viabilidade de transporte até o local a ser utilizado. A disponibilidade depende da abertura de novas áreas de exploração (jazidas ou bases de

poços) e, eventualmente, de novas estradas de acesso a essas áreas. Em polos de produção maduros, a abertura de novas frentes de exploração é pouco frequente, o que pode tornar a disponibilidade de *topsoil* menor do que a sua demanda para recuperação de áreas do entorno com ciclo de exploração encerrado.

A viabilidade de transporte do *topsoil* entre as áreas doadora e receptora dependerá da distância entre elas. A operação de transposição do *topsoil* possui custo relativamente alto, que aumenta em proporção à distância de transporte a tal ponto que a operação se torna impraticável. Para se ter ideia de volume, para a aplicação de uma camada de 10 cm em um hectare são necessárias cem viagens de caminhão com capacidade para transportar 10 m³ de *topsoil* por viagem. Em situações em que há disponibilidade de material para transposição, mas a quantidade não for suficiente para a aplicação em área total, deve-se priorizar sua aplicação em taludes, visando estabilizá-los pela promoção de um rápido recobrimento com vegetação. O restante de material disponível pode ser aplicado em faixas ao longo das áreas planas, em paralelo ao plantio de mudas.

De forma geral, entende-se que a aplicação de uma camada entre 8 cm e 15 cm de espessura é suficiente para promover os benefícios esperados. Camadas mais espessas (a partir de 20 cm) são recomendáveis em áreas em que o substrato apresenta problemas de salinidade, desde que utilizado com outras medidas de mitigação, como aplicações de gesso e a garantia de boa drenagem das águas pluviais. Recomenda-se que o transporte e a deposição do *topsoil* na área sejam realizados antes das operações de subsolagem, de modo a facilitar o trânsito dos caminhões na área e sua distribuição na superfície do terreno. Caso a operação de distribuição seja realizada após a subsolagem, é recomendável que o *topsoil* seja espalhado na área utilizando tratores de esteira, a fim de minimizar a compactação do substrato (Figura 11).

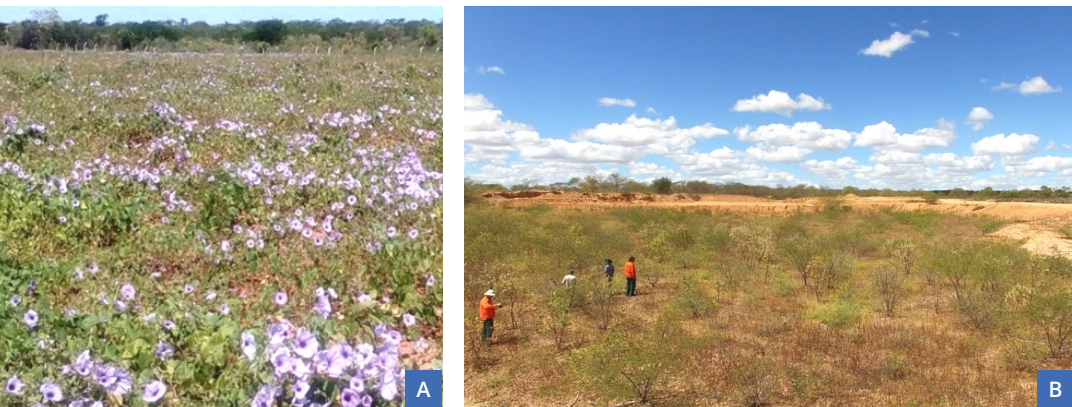


Figura 11. Etapas da aplicação do *topsoil* em jazida de piçarra. (A) Transporte e deposição do *topsoil* anteriormente à subsolagem. (B) Distribuição do *topsoil* anteriormente à subsolagem do terreno utilizando trator de esteira. (C) Área após a distribuição do *topsoil* e subsolagem.

Eficiência do *topsoil* na revegetação

Avaliações realizadas em jazidas de piçarra que receberam *topsoil* demonstram que o padrão florístico da regeneração natural resultante pode variar muito. O padrão mais comum é uma intensa colonização da área por espécies herbáceas já durante as primeiras chuvas após a aplicação (Figura 12A). No entanto, mesmo após os primeiros anos, há rara emergência de espécies de porte arbóreo. Em poucas situações, entretanto, observa-se a ocorrência de uma regeneração com alta diversidade, tanto de espécies de hábito herbáceo como arbustivo e arbóreo (Figura 12B).

Avaliações do banco de sementes de áreas com vegetação nativa próximas a áreas degradadas por atividades de exploração e produção de petróleo e gás em terra no Rio Grande do Norte indicaram ser um padrão comum a predominância, no *topsoil*, de espécies de hábito herbáceo sobre aquelas de hábito arbustivo e arbóreo. Das que germinaram a partir do solo coletado naquelas áreas, 87% eram herbáceas ou subarbustos, 4%, arbustos e 9%, arbóreas (Souza et al., em preparação).



Fotos: Guilherme Montandon Chaer

Figura 12. Imagens de áreas degradadas que receberam camada de 15 cm de *topsoil* cerca de um ano após a aplicação. (A) Ocorrência de intensa colonização com forte dominância de poucas espécies herbáceas. (B) Formação de um padrão de regeneração com alta diversidade de espécies e hábitos de crescimento.

Outro fator que pode explicar as diferenças florísticas resultantes da aplicação do *topsoil* em áreas diversas diz respeito ao tempo e à condição de estocagem do material previamente à sua utilização. Em estudo realizado em região semiárida da Austrália, Golos e Dixon (2014) mostraram que o *topsoil* estocado em pilhas de 6 m de comprimento x 1,5 m de largura e 1 m de altura tiveram significativo declínio no banco de sementes após um ano de estocagem, com queda de 68% na viabilidade após dois anos. Segundo os autores, a maior longevidade do banco de sementes em ambientes áridos ou semiáridos está diretamente relacionada à extensão do período de baixa umidade no solo. Sob solo seco, há menor probabilidade de germinação e de perda de sementes por envelhecimento devido ao umedecimento (Long et al., 2009). O simples fato de colocar uma cobertura à prova d'água sobre a pilha do *topsoil* estocado, protegendo-a das chuvas, aumentou em 3,5 vezes a emergência de plantas em comparação à ocorrida a partir de *topsoil* cujas pilhas não foram cobertas (Golos; Dixon, 2014).

Apesar de não haver estudos sobre a perda de viabilidade do banco de sementes em *topsoil* estocados na região da Caatinga, os estudos de Golos e Dixon (2014) e de outros autores (Moraes et al., 2017) permitem fazer algumas recomendações de ordem prática para seu bom uso e manejo na revegetação de áreas degradadas desse bioma. Primeiramente, o *topsoil* deve ser aplicado na área de destino no menor intervalo de tempo possível desde sua remoção na área de origem. Nesse aspecto, sempre que possível, a operação de retirada da área doadora deve ocorrer em paralelo ao transporte e à distribuição na área receptora. Em segundo lugar, deve-se priorizar as operações de remoção do *topsoil* durante o período seco do ano, de modo a causar menos impacto sobre o banco de sementes (Nascimento, 2013). Quando o *topsoil* precisar ser armazenado por longos períodos, seja na área de origem, seja na de destino, é possível que o recobrimento com lona impermeável reduza a perda de viabilidade do banco de sementes por impedir que a umidade das chuvas diminua a

viabilidade das sementes. Entretanto, é necessário que estudos sejam realizados na região para averiguar essa hipótese.

Independente do padrão de vegetação resultante do *topsoil*, sua aplicação nas áreas contendo piçarra propicia uma série de benefícios, especialmente o aumento da diversidade vegetal e um rápido recobrimento do substrato com vegetação herbácea, fato que irá conferir boa proteção contra a erosão hídrica. Outros benefícios decorrentes são a atração de fauna silvestre (Brennan et al., 2005), a adição de carbono orgânico ao solo, com conseqüente promoção da atividade biológica e da ciclagem de nutrientes (Fontes et al., 2015; Lima et al., 2015b), dentre outros. Quando a aplicação do *topsoil* for insuficiente para colonizar a área com vegetação de porte arbóreo, podem ser efetuados plantios de enriquecimento em anos posteriores à aplicação do *topsoil* ou concomitantemente à sua aplicação, conforme discutido no tópico a seguir.

Aplicação de *topsoil* junto ao plantio de mudas

A combinação das técnicas de aplicação de *topsoil* com o plantio de mudas de espécies arbóreas pode ser uma maneira mais rápida e eficiente de atingir a cobertura vegetal da área degradada, com elevado nível de diversidade. Por exemplo, estudo de Corrêa et al. (2018) em sete áreas de mineração no Cerrado do Distrito Federal estimou que áreas deixadas sob regeneração natural levariam quase um século para atingir 80% de cobertura vegetal, enquanto aquelas plantadas com espécies de árvores nativas levariam cerca de cinquenta anos. Já a combinação do *topsoil* com o plantio de mudas de espécies arbóreas reduziu o período de cobertura de 80% da superfície exposta para trinta a quarenta e oito meses.

Dois estudos experimentais avaliaram a conjugação da aplicação de *topsoil* com o plantio de mudas de espécies arbóreas nativas nas áreas degradadas por atividades de exploração de petróleo e gás em terra, na Caatinga. O primeiro iniciou em 2007 uma seleção de espécies em jazidas de piçarra (Resende; Chaer, 2010; Lima et al., 2015a). Nesse estudo, as vinte espécies arbóreas foram planta-

das tanto em parcelas nuas (diretamente sobre a piçarra), quanto em parcelas em que se aplicou, previamente ao plantio, uma camada de 20 cm de *topsoil*. Foi observado nas seis jazidas estudadas que a aplicação de *topsoil* permitiu, já durante o primeiro período de chuvas, um rápido recobrimento do substrato com vegetação herbácea, mas reduziu a taxa de sobrevivência e de crescimento de parte das espécies arbóreas plantadas, como mulungu (*Erythrina velutina*), neem (*Azadirachta indica*), tento (*Adenanthera pavonina*), ipê-roxo (*Handroanthus impertiginosus*), aroeirinha (*Schinus terebinthifolia*) e cumaru (*Amburana cearenses*). Lima et al. (2015a) sugeriram que o menor crescimento das espécies arbóreas quando plantadas sobre o *topsoil* (em relação às plantadas diretamente na piçarra) está relacionado à textura arenosa do *topsoil* utilizado, que resultou em menor capacidade de retenção de água para as plantas, e à abundante regeneração das plantas herbáceas, as quais aumentaram a competição por água e nutrientes com as árvores jovens.

É interessante notar que os efeitos de cobertura do solo pela vegetação herbácea proporcionados pela aplicação de *topsoil* se mostram persistentes no longo prazo. A imagem apresentada na Figura 13, de uma das jazidas do estudo de Lima et al. (2015a), foi obtida nove anos após a aplicação de *topsoil* em 50% da área. Pela imagem é fácil distinguir as áreas que receberam *topsoil* das que não receberam. Estas ainda permaneciam com baixa taxa de cobertura do solo com vegetação.

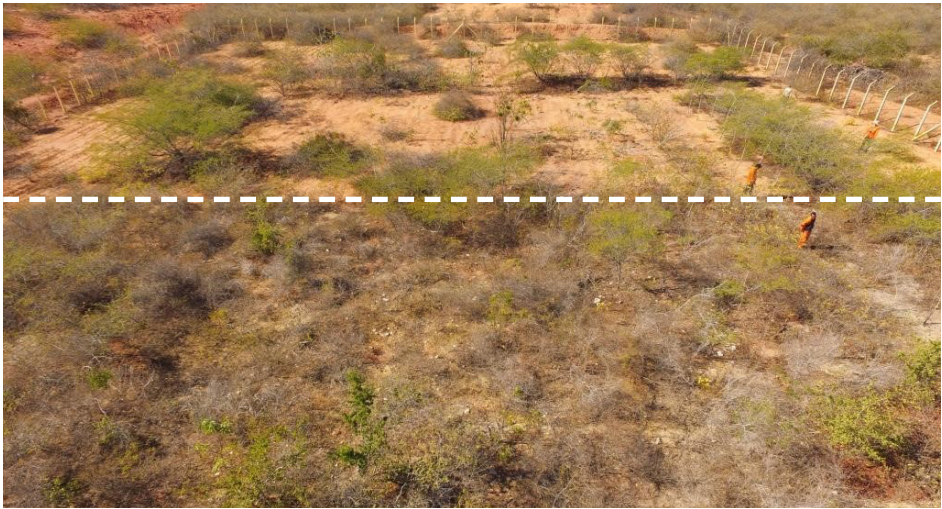


Figura 13. Área de jazida de piçarra utilizada para experimento de seleção de espécies iniciado em 2007. Na porção abaixo da linha tracejada ocorreu aplicação de *topsoil* e acima, não houve aplicação. Imagem obtida no início da estação seca (julho) de 2016 (Areia Branca, RN).

O segundo estudo experimental visando avaliar a revegetação utilizando concomitantemente aplicação de *topsoil* e plantio de mudas de espécies arbóreas começou em 2018, em uma jazida de piçarra localizada em Pendências, Rio Grande do Norte (Souza et al., em elaboração). Foram comparadas parcelas com e sem aplicação desse material. O *topsoil* foi distribuído na área com trator de esteira formando uma camada aproximada de 8 cm, com posterior subsola-gem da área (Figura 11B, C). As parcelas com e sem *topsoil* foram subdivididas para abrigar três tratamentos: (I) sem plantio de mudas; (II) com o plantio de mudas de 15 espécies arbóreas nativas da Caatinga (espaçamento de 2 m x 2 m) e (III) com o plantio de mudas similar a II, mas utilizando bagana de carnaúba como cobertura morta (*mulching*) na coroa das mudas (proporção de 10 L/planta) (Figura 14A). A bagana de carnaúba, localmente também denominada de paú, é um resíduo palhoso derivado da extração da cera das folhas da palmeira carnaúba (*Copernicia prunifera*), comum na região. Desse modo, procurou-se avaliar também se essa cobertura morta teria o efeito de minimizar

a competição da vegetação herbácea, regenerante a partir do *topsoil*, com as espécies arbóreas plantadas.

Vinte e quatro meses após a intervenção na área (durante o segundo período de chuvas), o *topsoil* promoveu a cobertura do solo com espécies herbáceas (Figura 14B). Ao contrário do observado no estudo de Lima et al. (2015a), a presença do *topsoil* não interferiu na taxa de sobrevivência da maioria das espécies arbóreas plantadas ou no crescimento em altura. Entretanto, árvores plantadas sobre o *topsoil* apresentaram menor média de área de copa (redução de 23%).



Fotos: Guilherme Montandon Choer

Figura 14. (A) Detalhe da aplicação da bagana de carnaúba em planta jovem de pau-ferro (*L. ferrea*) distribuído em raio de 30 cm a partir do coleto. (B) Visão do tratamento com aplicação de *topsoil* um ano após a aplicação durante o período de chuvas (maio de 2019). Indivíduos arbóreos ao fundo foram introduzidos pelo plantio de mudas.

Aos 24 meses, o tratamento com a aplicação de cobertura morta com bagana de carnaúba promoveu um maior crescimento das árvores tanto em altura quanto em área de copa. Entretanto, o efeito da cobertura morta foi especialmente maior nas áreas com *topsoil* quando as plantas estavam mais jovens (13 meses), observando-se um aumento de 22% na média de crescimento. Este fato pode estar relacionado a vários benefícios promovidos pela cobertura morta, como redução da competição das árvores plantadas com a vegetação herbácea por água

e nutrientes na região da coroa coberta. Outros benefícios podem estar ligados a uma melhor manutenção da umidade do solo e a uma redução da temperatura do solo (Silva et al., 2018; Gonçalves et al., 2020).

Nesse mesmo estudo também foi realizada uma análise da taxa de cobertura do solo e da fitossociologia da regeneração natural nos tratamentos 24 meses após o plantio. Na análise das áreas que receberam *topsoil* foram encontradas 44 morfoespécies, representando 11 famílias botânicas, e uma taxa de cobertura do solo entre 75% e 100% (escala de Braun-Blanquet, 1979). Já nas áreas sem aplicação de *topsoil* foram encontradas 35 morfoespécies (19 delas em comum entre os tratamentos) de 12 famílias, mas com uma taxa de cobertura do solo inferior a 25%. Deve-se ressaltar que as áreas eram adjacentes e é possível, principalmente para as espécies herbáceas, que a área com *topsoil* possa ter funcionado como fonte de propágulos para a área sem *topsoil*. Setenta por cento das espécies regenerantes identificadas possuíam hábito herbáceo e apenas três tinham hábito arbóreo – umbu (*Spondias tuberosa*), catingueira (*Cenostigma pyramidale*) e pinhão-manso (*Jatropha curcas*). Destas, todas ocorreram na área com *topsoil* e apenas o pinhão-manso também na área sem *topsoil*.

Com base nos resultados dos estudos experimentais apresentados e em observações de campo em áreas que receberam *topsoil*, é possível indicar sua aplicação sempre que houver disponibilidade e viabilidade econômica para transporte, com o menor tempo de armazenamento possível. A conjugação do *topsoil* e o plantio de mudas apresenta a vantagem adicional de garantir a colonização do substrato por espécies arbóreas nativas, que possuirão papel complementar e fundamental para a recuperação da área.

Entretanto, é recomendável que sejam tomadas medidas para controlar a matocompetição entre as árvores jovens e a vegetação herbácea, notadamente durante a época das chuvas nos primeiros dois anos após o plantio. Esse controle pode ser realizado por meio de coroamentos das árvores com enxada ou com o uso de cobertura morta.

Técnica de semeadura direta na revegetação

A semeadura direta ganhou destaque como método alternativo de restauração florestal apenas recentemente (Palma; Laurance, 2015), destacando-se por seu baixo custo de aplicação e sua versatilidade (Pellizzaro et al., 2017; Silva; Vieira, 2017). Segundo alguns autores, os custos associados ao reflorestamento utilizando semeadura direta podem representar um terço do custo do plantio de mudas, uma vez que não requer produção, transporte e plantio de mudas, mesmo considerando uma baixa taxa de estabelecimentos das plantas advindas da semeadura direta (Grossnickle; Ivetić, 2017; Raupp et al., 2020). Além do menor custo de implantação, a semeadura direta apresenta a vantagem ecológica de atingir uma alta densidade de espécies, potencialmente semelhante à encontrada em locais resilientes após distúrbios (Freitas et al., 2019).

Entretanto, vários fatores têm sido indicados como limitantes à aplicação e à eficiência do método, como necessidade de obter grandes volumes de sementes, imprevisibilidade das taxas de germinação em campo, baixa viabilidade das sementes de algumas espécies, necessidade de maior manutenção das plantas jovens nos primeiros anos após a germinação e impossibilidade de armazenamento de sementes recalcitrantes (sementes que não sobrevivem à secagem e congelamento durante a conservação *ex situ*) (Lamb, 2011; Silva et al., 2015b; Rodrigues et al., 2019).

Por outro lado, diversos estudos têm buscado aumentar a eficiência da técnica por meio da semeadura direta, conjugada à transposição de serapilheira (Silva et al., 2015a) ou ao uso de cobertura morta e fertilização (Silva; Vieira, 2017; Silva et al., 2015b), quebra prévia de dormência das sementes (Jesus et al., 2017) e uso de protetores de germinação (Santos Júnior et al., 2004). Entretanto, cabe ressaltar que todos os estudos citados foram desenvolvidos em outras regiões do país, sobretudo nos biomas Cerrado e Mata Atlântica.

O primeiro estudo da equipe para avaliação da técnica de semeadura direta em áreas degradadas por exploração de petróleo e gás em terra na Caatinga foi iniciado em 2018 em uma jazida de piçarra em Pendências, Rio Grande do Norte (Souza et al., no prelo). O objetivo foi avaliar o efeito da quebra da dormência de sementes, do uso de hidrogel e do protetor de germinação sobre o crescimento e a taxa de sobrevivência das espécies orelha-de-macaco (*E. contortisiliquum*), angico-vermelho (*A. colubrina*), sabiá (*M. caesalpinifolia*), pau-ferro (*L. ferrea*), jurema-preta (*M. tenuiflora*), jurema-branca (*P. retusa*), pereiro (*A. pyrifolium*) e catanduva (*P. moniliformis*) após semeadura direta na piçarra.

Sementes dessas espécies foram coletadas em fragmentos de vegetação nativa da região e beneficiadas previamente ao uso. Berços de semeadura de 15 cm de diâmetro por 25 cm de profundidade foram condicionados com um litro de composto orgânico em todos os tratamentos. O tratamento com hidrogel consistiu na aplicação de um litro do gel hidratado por berço, e o protetor de germinação utilizado foi um copo plástico transparente de 400 mL invertido sobre o local de semeadura, fixado ao substrato com um espeto de madeira, conforme demonstrado na Figura 15A. Foram semeadas quatro sementes por berço a 3 cm de profundidade durante a estação das chuvas. Quando as plântulas germinadas atingiam a parte superior do copo, este era retirado, possibilitando o livre crescimento das plantas (Figura 15B).

A quebra de dormência das sementes influenciou diferentemente a taxa de germinação em campo. Orelha-de-macaco, pereiro e pau-ferro apresentaram elevadas taxas de germinação (>70%) e foram indiferentes ao tratamento de quebra de dormência. Já a taxa de germinação com quebra da dormência do sabiá e da jurema-preta cresceu de 30% para 100% e de 26% para 83%, respectivamente. Ao contrário, a taxa de germinação da catanduva e do angico-vermelho caiu de 83% para 22% e de 91% para 33%, respectivamente, quando as sementes passaram pela quebra de dormência, mostrando que a prática deve ser avaliada espécie a espécie.

Em geral, a presença do hidrogel não afetou a germinação, mas o protetor resultou em significativos aumentos nas taxas de germinação de catanduva (aumento de ~50% para ~90%), sabiá (aumento de ~35% para ~70%), jurema-preta (~30% para ~60%) e angico-vermelho (~10% para ~20%).

Após 13 meses da semeadura direta, 23% das juremas-branca germinadas permaneciam vivas e estabelecidas na área. Esse percentual foi maior para as demais espécies, atingindo cerca de 50% para jurema-preta e orelha-de-macaco (Figura 15C). Para o pau-ferro e o sabiá, a presença de hidrogel reduziu a taxa de sobrevivência de 70% para 52%, enquanto para a catanduva, o hidrogel aumentou a sobrevivência de 60% para 82%.

Independentemente das variações causadas pelos tratamentos testados, os resultados desse primeiro estudo são muito promissores para o emprego da semeadura direta em áreas com piçarra na Caatinga, considerando os elevados valores médios de germinação e de sobrevivência um ano após a semeadura. Um outro fator que contribuiu para o sucesso dessa técnica na área de jazida de piçarra avaliada foi a baixa competição das espécies semeadas com outras plantas herbáceas, aspecto que é considerado um grande entrave quando a semeadura direta é aplicada na restauração ecológica em áreas dominadas por gramíneas exóticas em regiões úmidas do País (Camargo et al., 2002).



Figura 15. (A) Detalhe do protetor físico de germinação constituído de um copo plástico de 400 mL invertido sobre o local de sementeira e fixo com um espeto de madeira. Notar as gotículas de água condensada no interior do copo indicando a alta umidade relativa no interior. (B) Plântulas de orelha-de-macaco (*E. timbouva*) após retirada do copo plástico. (C) Vista parcial da área experimental com plantas jovens de orelha-de-macaco, em destaque no primeiro plano, cerca de 100 dias após a germinação.

Um segundo estudo foi iniciado em 2019 na mesma jazida para avaliar o potencial da sementeira direta de outras vinte espécies arbóreas e arbustivas do bioma. Os resultados preliminares indicaram boas taxas de germinação para a maioria das novas espécies em teste, porém, para algumas, isso somente ocorreu na presença do protetor de germinação.

O protetor diminui a intensidade do ataque de herbívoros e favorece a criação de um microambiente favorável à germinação (Santos Júnior et al., 2004). Santos et al. (2012) mostraram que essa técnica foi eficaz no estabelecimento e no desenvolvimento inicial de mudas de *Erythrina velutina* Willd., *Bowdichia virgilioides* Kunth, *Guazuma ulmifolia* Lam., *Lonchocarpus sericeus* (Poir.) Kunth ex DC. e *Sapindus saponaria* L. em um experimento realizado em São Cristóvão, Sergipe (Santos et al., 2012). O mesmo estudo apontou que características físicas das sementes, como tamanho e massa específica, também influenciam no estabelecimento das espécies.

Em outro estudo, Santos Júnior et al. (2004) concluíram que o uso do protetor de sementes também foi eficaz para promover a germinação e a sobrevivência das cinco espécies estudadas (*Cedrela fissilis* Vell., *Copaifera langsdorffii* Desf., *Enterolobium contortisiliquum* [Vell.] Morong, *Piptadenia gonoacantha* [Mart.] Macbr. e *Tabebuia serratifolia* [Vahl] Nich.), principalmente na defesa contra o ataque de formigas.

Ainda em relação ao protetor de germinação, é importante ressaltar a alta umidade relativa do ar no interior do copo, o qual muito frequentemente apresenta gotículas de condensação d'água em seu interior (Figura 15A). Outro aspecto observado nas áreas de estudo foi que durante chuvas torrenciais sobre o substrato exposto houve movimentação de sedimentos em direção à área experimental. Nesses casos, foi notado que o protetor evitou cobertura da semente pelos sedimentos. A semente permaneceu na mesma posição relativa à superfície inicial. Esse aspecto pode ser observado na Figura 15A, a qual mostra o terço inferior do protetor soterrado, mas com seu interior protegido. Esses aspectos podem explicar as maiores taxas de germinação observadas na presença desse aparato.

Nucleação para otimização da regeneração natural

A regeneração natural geralmente se processa de maneira muito lenta nas áreas degradadas por extração ou uso de piçarra na Caatinga, fato que justifica, na maioria dos casos, o uso de estratégias que envolvem a introdução ativa de vegetação, como o plantio de mudas, a transposição de *topsoil* e a semeadura direta discutidos nos tópicos anteriores. No entanto, em algumas situações, a regeneração natural pode ser promovida pelo uso de técnicas simples de nucleação, as quais poderão ser implementadas em paralelo às demais estratégias de revegetação.

A nucleação consiste em criar pequenos habitats ou núcleos dentro da área degradada, formando um ambiente diferenciado e propício ao recrutamento (atração e fixação) de espécies provenientes de áreas naturais vizinhas. Desse modo, o núcleo irá concentrar espécies por abrigar condições de fertilidade, umidade e/ou proteção que propiciam a chegada de animais, vegetais e microrganismos que formarão comunidades e interações ecológicas (Moura; Silva, 2021). A ideia é que esses núcleos, ao promoverem a regeneração natural, irão eventualmente crescer e coalescer formando um *continuum* de vegetação.

Um elemento geralmente disponível nas áreas degradadas e bastante útil para a formação de núcleos de regeneração natural é a galharia proveniente da vegetação removida durante a abertura da área para exploração. Nesse caso, a galharia funciona como abrigo para pequenos animais, que depositam sementes através de seus excrementos, e um ambiente sombreado com maior umidade para a germinação e o desenvolvimento das plantas. A galharia, quando disposta em pequenos núcleos ou em taludes, conforme recomendado para o controle da erosão, pode ter resultados expressivos na promoção da regeneração natural. A Figura 16A mostra a condição de um talude de uma jazida de piçarra cerca de três anos após ser coberto com galharia. É notável a grande

diferença de colonização vegetal do talude em relação à área plana da jazida contendo o substrato ainda exposto, e a outro talude, localizado na mesma área, que não recebeu a galharia (Figura 16B).



Fotos: Guilherme Montandon Choer

Figura 16. (A) Área de jazida de piçarra com vista de talude recoberto com galharia há cerca de três anos. Notar a forte regeneração natural junto ao talude que contrasta com a área plana da jazida. (B) Área da mesma jazida com vista de talude que não recebeu galharia. Notar a baixa regeneração natural e a ocorrência de sulcos de erosão.

O *topsoil* também pode ser utilizado dentro do conceito de nucleação, quando aplicado de forma sistemática em pequenos núcleos. Nesses casos, o *topsoil* pode ainda ser enriquecido com sementes de espécies arbóreas nativas e adicionado a berços previamente enriquecidos com fertilizantes e/ou material orgânico. Embora essa técnica não tenha sido avaliada experimentalmente em áreas de piçarra na Caatinga, algumas evidências indicam que possa ser desenvolvida como alternativa de revegetação.

Por exemplo, em 2018 berços para o plantio de mudas foram preparados com aplicação da técnica em jazida de piçarra anexa a uma das áreas de estudo em Pendências. Os berços foram adubados com esterco de curral como complemento à adubação química com P e micronutrientes. Entretanto, a área acabou não sendo plantada naquele ano. Durante o período de chuvas de 2019 observou-se uma intensa regeneração natural originada a partir dos berços de plantio (Figura 17).

Posteriormente verificou-se que o esterco utilizado não tinha sido curtido, conforme é recomendado. Ou seja, continha uma grande quantidade de sementes viáveis de espécies ruderais que tinham servido de alimentação ao gado. Certamente não é recomendável o uso do esterco fresco para promover a nucleação, como acidentalmente ocorreu nesse caso, pois é alto o risco de introdução de espécies exóticas e invasoras. Entretanto, o fato sugere que o uso da mesma estratégia, mas utilizando *topsoil* ou outros veículos, como esterco curtido ou composto orgânico enriquecidos com sementes de espécies nativas, pode ser uma opção interessante de aplicação do princípio de nucleação para promover a revegetação dessas áreas degradadas.



Fotos: Guilherme Montandon Chaer

Figura 17. Regeneração natural em jazida de piçarra se estabelecendo a partir dos berços de plantio adubados com esterco bovino fresco contendo sementes de espécies ruderais.

Modelo de tomada de decisão

A Figura 18 apresenta uma árvore decisória que pode ser utilizada para definir a estratégia a ser adotada para recuperar determinada área degradada. Cabe destacar que as etapas de ordenamento da paisagem, no caso das jazidas de piçarra, de preparo do solo (subsolagem) e de cercamento são comuns a todos os tipos de áreas degradadas por atividades de exploração de petróleo e gás em terra.

A primeira questão da árvore decisória diz respeito à presença ou não de problemas de salinização do substrato, fato que irá direcionar ações de recuperação distintas. Áreas com substrato sódico ou salino devem, antes ou após a subsolagem, receber uma aplicação de gesso em superfície, sem necessidade de incorporação. O gesso auxiliará na lixiviação dos sais em excesso e irá melhorar a disponibilidade dos nutrientes para as plantas. As doses de gesso recomendadas dependerão dos valores de porcentagem de sódio trocável (PST) e da capacidade de troca catiônica do solo (CTC pH7).⁴

Quando disponível, a aplicação de *topsoil* permitirá que as plantas se desenvolvam em uma camada sem excesso de sais, inclusive permitindo o plantio de mudas de espécies arbóreas. Entretanto, quando não houver *topsoil* disponível, a revegetação deverá ocorrer pelo plantio de mudas de espécies arbóreas nativas, preferencialmente aquelas conhecidamente adaptadas à condição de alta salinidade (Figura 18). A aplicação de esterco bovino curtido na cova de plantio, conjugado à aplicação de gesso, também pode auxiliar a reduzir a salinidade e aumentar a infiltração de água no solo (Gonçalo Filho et al., 2019).

Nas demais situações (substratos não salinos), o *topsoil* deverá sempre ser utilizado quando houver disponibilidade, seja em jazidas de piçarra, bases de poços ou centrais de depósito de resíduos. Conforme discutido anteriormente, o plantio de mudas concomitante à aplicação do *topsoil* é desejável como forma

⁴ Um detalhamento de como efetuar o cálculo da dosagem de gesso pode ser encontrada em <https://agronomiacomgismonti.blogspot.com/2012/08/calculador-dose-de-gesso-agricola-para.html>.

de enriquecimento da flora, especialmente quando o potencial de regeneração de vegetação arbórea a partir do *topsoil* for baixo ou quando não houver material suficiente para aplicação em toda a área (Figura 18). Quando não houver *topsoil* disponível, deve-se realizar o plantio de mudas de espécies arbóreas nativas. Nessas situações, a revegetação pode ser complementada com uso de técnicas de nucleação, como a disposição de galharia em taludes ou em núcleos dispersos na área (Figura 18).

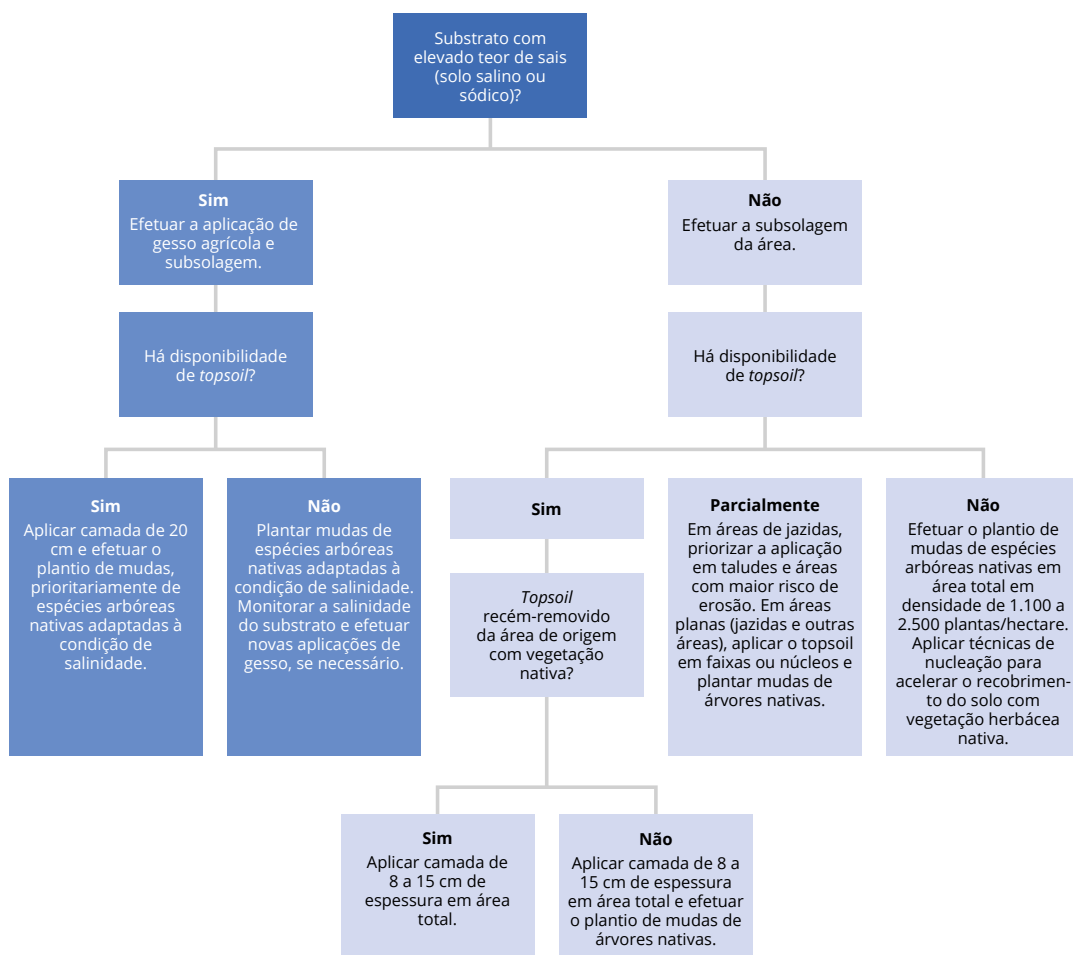


Figura 18. Árvore decisória para ações de revegetação em áreas degradadas por atividades de exploração de petróleo e gás em terra, no bioma Caatinga.

Considerações finais

A Caatinga apresenta características extremas comparada a outros biomas brasileiros, como a mais baixa e irregular precipitação anual, as mais altas médias de temperatura, evapotranspiração potencial e radiação solar e a mais baixa taxa de umidade relativa do ar. Esses fatores climáticos, conjugados com o ambiente e o inóspito substrato das jazidas de piçarra, fazem com que a recuperação ambiental demande cuidados e estratégias distintas das comumente empregadas em regiões mais úmidas do Brasil.

A experiência acumulada a partir de pesquisas realizadas durante os últimos 14 anos em áreas degradadas por atividades de exploração e produção de petróleo e gás em terra no Rio Grande do Norte permite afirmar que a recuperação/revegetação das áreas com espécies predominantemente nativas do bioma Caatinga é possível em períodos relativamente curtos, especialmente quando combinado o plantio de mudas com a transposição de *topsoil*. As técnicas de semeadura direta e nucleação também são opções promissoras e de menor custo para revegetar as áreas, mas demandam mais estudos para avaliar resultados no médio-longo prazo. No mesmo sentido, pesquisas visando avaliar o desempenho de novas espécies nativas nas áreas impactadas devem ser contínuas, de modo a ampliar o rol de espécies utilizadas nos reflorestamentos e a correta indicação de espécies para plantio sob condições especiais, como áreas inundáveis ou salinizadas.

Referências

- ABROL, I. P.; YADAV, J. S. P.; MASSOUD, F. I. **Salt-affected soils and their management**. Rome: FAO, 2021 1988. Disponível em: <http://www.fao.org/3/x5871e/x5871e00.htm>. Acesso em: 10 ago. 2021.
- ALMEIDA, A. D. **Uso da camada superficial de solo na revegetação do estéril da extração de granito**. 2006. 57 p. Dissertação. (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.
- ALMEIDA, D. S. Modelos de recuperação ambiental. In: ALMEIDA, D. S. **Recuperação ambiental da Mata Atlântica**. 3. ed. rev. e ampl. Ilhéus: Editus, 2016, p. 100-137. DOI: 10.7476/9788574554402.
- BELL, J.; WELLS, S.; JASPER, D. A.; ABBOTT, L. K. Field inoculation with arbuscular mycorrhizal fungi in rehabilitation of mine sites with native vegetation, including *Acacia* spp. **Australian Systematic Botany**, v. 16, p. 131-138, 2003. DOI 10.1071/SB02004.
- BRADY, N. C.; WEIL, R. R. **The nature and properties of soils**. 15th ed. Columbus, Pearson, 2016.
- BRANCALION, P. H. S.; RODRIGUES, R. R.; GANDOLFI, S. **Restauração Florestal**. São Paulo: Oficina de Textos, 2015. 432 p.
- BRAUN-BLANQUET, J. **Fitosociologia**: bases para el estudio de las comunidades vegetales. 3. ed. Madrid: Blume Ediciones, 1979. 820 p.
- BRENNAN, K. E. C.; NICHOLS, O. G.; MAJER, J. D. **Innovative techniques for promoting fauna return to rehabilitated sites following mining**. Perth: Australian Centre for Minerals Extension and Research; Brisbane: Brisbane and Minerals and Energy Research Institute of Western Australia, 2005. (MERIWA Report 248). Disponível em: <http://hdl.handle.net/20.500.11937/24154>. Acesso em: 10 ago. 2021.
- CAMARGO, J. L. C.; FERRAZ, I. D. K.; IMAKAWA, A. M. Rehabilitation of degraded areas of central Amazonia using direct sowing of forest tree seeds. **Restoration Ecology**, v. 10, p. 636-644, 2002. DOI: 10.1046/j.1526-100X.2002.01044.x.

CARRICK, P. J.; KRUGER, R. Restoring degraded landscapes in lowland Namaqualand: lessons from the mining experience and from regional ecological dynamics. **Journal of Arid Environments**, v. 70, p. 767-781, 2007. DOI: 10.1016/j.jaridenv.2006.08.006.

CAVALCANTI, N. B.; RESENDE, G. M. Ocorrência de xilopódio em plantas nativas de imbuzeiro. **Revista Caatinga**, v. 19, n. 3, p. 287-293, 2006. Disponível em: <https://periodicos.ufersa.edu.br/index.php/caatinga/article/view/75/54>. Acesso em: 11 ago. 2021.

CHAER, G. M.; RESENDE, A. S.; CAMPELLO, E. F. C.; FARIA, S. M.; BODDEY, R. M. Nitrogen-fixing legume tree species for the reclamation of severely degraded lands in Brazil. **Tree Physiology**, v. 32, n. 2, p. 139-149, 2011. DOI: 10.1093/treephys/tpq116.

CLAESSEN, M. E. C. (org.). **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. rev. e atual. Rio de Janeiro: EMBRAPA-CNPq, 1997. 212 p.

CORRÊA, R. S.; BALDUÍNO, A. P. C.; TEZA, C. T. V.; BAPTISTA, G. M. M. Vegetation cover development resulting from different restoration approaches of exploited mines. **Floresta e Ambiente**, v. 25, n. 4, e20171116, 2018. DOI: 10.1590/2179-8087.111617.

DIAS, D. D. **Recrutamento e estabelecimento de plantas após transposição de topsoil para área degradada pela mineração de bauxita**. 2017. 66 p. Dissertação (Mestrado em Ecologia de Biomas Tropicais) - Instituto de Ciências Exatas e Biológicas, Universidade Federal de Ouro Preto.

FONTES, M. A.; ROCHA, P. V.; LIMA, K. D. R.; LIMA, I. S. S.; CHAER, G. M.; CAMPELLO, E. F. C.; RESENDE, A. S. Fracionamento da matéria orgânica em áreas degradadas pela extração de piçarra na Caatinga, RN. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 35., 2015, Natal. **O solo e suas múltiplas funções**: anais. Natal: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2015.

FRANCO, A. A.; FARIA, S. M. de. The contribution of N₂-fixing tree legumes to land reclamation and sustainability in the tropics. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 29, p. 897-903, 1997. DOI 10.1016/S0038-0717(96)00229-5.

FREITAS, M. G.; RODRIGUES, S. B.; CAMPOS-FILHO, E. M.; CARMO, G. H. P.; VEIGA, J. M.; JUNQUEIRA, R. G. P.; VIEIRA, D. L. M. Evaluating the success of direct seeding for tropical forest restoration over ten years. **Forest Ecology and Management**, v. 438, p. 224-232, 2019. DOI: 10.1016/j.foreco.2019.02.024.

GARIGLIO, M. A.; SAMPAIO, E. V. S. B.; CESTARO, L. A. **Uso sustentável e conservação dos recursos florestais da Caatinga**. Brasília, DF: Serviço Florestal Brasileiro, 2010, 368 p.

GONÇALO FILHO, F. DIAS, N. D.; SUDDARTH, S. R.; FERREIRA, J. F.; ANDERSON, R. G.; FERNANDES, C. D.; LIRA, R. B.; FERREIRA NETO, M. F.; COSME, C. R. Reclaiming tropical saline-sodic soils with gypsum and cow manure. **Water**, v. 12, n. 1, 57. 2020. DOI: 10.3390/w12010057.

GONÇALVES, F. L. A. **Estratégias de recuperação de áreas degradadas pela exploração e produção de petróleo e gás natural na Caatinga**. 2020. 114 p. Tese (Doutorado) - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica.

GONÇALVES, M. P. M.; FELICIANO, A. L. P.; SILVA, A. P.; SILVA, L. B.; SILVA, K. M.; SILVA JÚNIOR, F. S.; GRUGIKI, M. A.; SILVA, M. I. O. Desenvolvimento em campo de espécies da Caatinga com o uso de resíduo de carnaúba. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 1, p. 1188-1200, 2020. DOI: 10.34117/bjdv6n1-083.

GOLOS, P. J.; DIXON, K. W. Waterproofing topsoil stockpiles minimizes viability decline in the soil seed bank in an arid environment. **Restoration Ecology**, v. 22, p. 495-501, 2014. DOI: 10.1111/rec.12090.

GROSSNICKLE, S. C., IVETIĆ, V. Direct seeding in reforestation: a field performance review. **Reforesta**, v. 4, p. 94-142, 2017. DOI: 10.21750/REFOR.4.07.46.

JASPER, D. A. Beneficial soil microorganisms of the Jarrah forest and their recovery in bauxite mine restoration in Southwestern Australia. **Restoration Ecology**, v. 15, p. 574-584, 2007. DOI: 10.1111/j.1526-100X.2007.00295.x.

JENNINGS, S. B.; BROWN, N. D.; SHEIL, D. Assessing forest canopies and understory illumination: canopy closure, canopy cover and other measures. **Forestry**, v. 72, p. 59-73, 1999. DOI: 10.1093/forestry/72.1.59.

LAMB, D. Ecological restoration. In: LAMB, D. (ed.). **Regreening the bare hills: tropical forest restoration in the Asia-Pacific region**. New York: Springer, 2011. p. 325-355

LEAL FILHO, N.; SANTOS, G. R.; FERREIRA, R. L. Comparando técnicas de nucleação utilizadas na restauração de áreas degradadas na Amazônia brasileira. **Revista Árvore**, v. 37, p. 587-597, 2013. DOI: 10.1590/S0100-67622013000400002.

LIMA, K. D. R. **Avaliação de espécies arbóreas e técnicas de plantio para recuperação de áreas degradadas por exploração de piçarra na caatinga.** 2012. 82 p. Dissertação. (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal Rural do Semiárido, Mossoró.

LIMA, K. D. R.; CAMARA, R.; CHAER, G. M.; PEREIRA, M. G.; RESENDE, A. S. Soil fauna as bioindicator of recovery of degraded áreas in the Caatinga biome. **Revista Caatinga**, v. 30, n. 2, p. 401-411, 2017. DOI: 10.1590/1983-21252017v30n215rc.

LIMA, K. D. R.; CHAER, G. M.; ROWS, J. R. C.; RESENDE, A. S. Seleção de espécies arbóreas para revegetação de áreas degradadas por mineração de piçarra na Caatinga. **Revista Caatinga**, v. 28, n. 1, p. 203-213, 2015a. Disponível em: https://periodicos.ufersa.edu.br/index.php/caatinga/article/view/3644/pdf_231. Acesso em: 10 ago. 2021.

LIMA, K. D. R.; LIMA, I. S. S.; FONTES, M. A.; CHAER, G. M.; CAMPELLO, E. F. C.; RESENDE, A. S. Bioindicadores de qualidade do solo em área degradada pela extração de piçarra na Caatinga, RN. In: In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 35., 2015, Natal. **O solo e suas múltiplas funções:** anais. Natal: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2015b.

LONG, R. L.; STEADMAN, K. J.; PANETTA, F. D.; ADKINS, S. W. Soil type does not affect seed ageing when soil water potential and temperature are controlled. **Plant and Soil**, v. 320, p. 131-140, 2009. DOI: 10.1007/s11104-008-9878-8.

MAIA, G. N. **Caatinga: árvores e arbustos e suas utilidades.** São Paulo: D&Z Computação Gráfica e Editora. 2004. 413 p.

MALAVOLTA, E. **ABC da Adubação.** São Paulo: Agronômica Ceres, 1979. S 256 p.

MORAES, R. P.; CARVALHO, W. A. C.; PEREIRA, J. A. A.; NASCIMENTO, G. O.; BARROS, D. A. Effect of topsoil sockpiling on the viability of seed bank in field phytophysiological fields of altitude. **Cerne**, v. 23, n. 3, p. 339-347, 2017. DOI: 10.1590/01047760201723032340.

MOREIRA, P. R. **Manejo de solo e recomposição da vegetação com vistas a recuperação de áreas degradadas pela extração de bauxita, Poços de Caldas, MG.** 2004. 139 p. Dissertação (Doutorado em Biologia) - Instituto de Biociências, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, São Paulo.

MOURA, F. B. P.; SILVA, J. V. **Restauração na Caatinga**. 2. ed. Maceió: EDUFAL. 2021. 223 p.

NASCIMENTO, G. O. **Estudos dos propágulos do topsoil sobre corpos de bauxita no planalto de Poços de Caldas, MG**. 2013. 103 p. Dissertação. (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Lavras, Lavras.

PALMA, A. C.; LAURANCE, S. G. W. A review of the use of direct seeding and seedling plantings in restoration: what do we know and where should we go? **Applied Vegetation Science**, v. 18, p. 561-568, 2015. DOI: 10.1111/avsc.12173.

PARROTA, J. A.; KNOWLES, O. H. Restauração florestal em áreas de mineração de bauxita na Amazônia. In: KAGEYAMA, P. Y.; OLIVEIRA, R. E.; MORAES, L. F. D.; ENGEL, V. L.; GANDARA, F. B. (eds.). **Restauração ecológica de ecossistemas naturais**. São Paulo: Fundação de Estudos e Pesquisas Agrícolas e Florestais-FEPAF, 2003. p. 307-330.

PELLIZZARO, K. F.; CORDEIRO, A. O. O.; ALVES, M.; RIBEIRO, F.; MOTTA, C. P.; REZENDE, G. M.; SILVA, R. R. P.; SCHMIDT, I. B. “Cerrado” restoration by direct seeding: field establishment and initial growth of 75 trees, shrubs and grass species. **Brazilian Journal of Botany**, v. 40, p. 681-693, 2017. DOI: 10.1007/s40415-017-0371-6.

PILON, N. A.; BUISSON, E.; DURIGAN, G. Restoring Brazilian savanna ground layer vegetation by topsoil and hay transfer. **Restoration Ecology**, v. 26, p. 73-81, 2018. DOI: 10.1111/rec.12534.

RAMOS, K. M. O.; FELFILL, J. M.; FAGG, C. W.; SOUSA-SILVA, J. C.; FRANCO, A. C. Desenvolvimento inicial e repartição de massa seca de *Amburana cearensis* (Allemão) A. C. Smith, em diferentes condições de sombreamento. **Acta Botânica Brasílica**, v. 18, n. 2, p. 351-358, 2004. DOI: 10.1590/S0102-33062004000200014.

RAUPP, P. P.; FERREIRA, M. C.; ALVES, M.; CAMPOS-FILHO, E. M.; SARTORELLI, P. A. R.; CONSOLARO, H. N.; VIEIRA, D. L. M. Direct seeding reduces the costs of tree planting for forest and savana restoration. **Ecological Engineering**, v. 148, p. 105-788, 2020. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2020.105788.

RESENDE, A. S.; CHAER, G. M. **Manual para recuperação de áreas degradadas por extração de piçarra na Caatinga**. Seropédica: Embrapa Agrobiologia, 2010. 78 p.

RICHARDS, L. A. (ed.). **Diagnosis and improvement of saline and alkali soils**. Washington: United States Salinity Laboratory, 1954. 160 p. (Agriculture Handbook, 60).

RODRIGUES, R. R.; GANDOLFI, S.; NAVE, A. G.; ARONSON, J.; BARRETO, T. E.; VIDAL, C. Y.; BRANCALION, P. H. S. Large-scale ecological restoration of high-diversity tropical forests in SE Brazil. **Forest Ecology and Management**, 261, p. 1605-1613, 2011. DOI: 10.1016/j.foreco.2010.07.005.

SANTOS JÚNIOR, N. A.; BOTELHO, S. A.; DAVIDE, A. C. Estudo da germinação e sobrevivência de espécies arbóreas em sistema de semeadura direta, visando à recomposição de mata ciliar. **Cerne**, v. 10, n. 1, p. 103-117, 2004. Disponível em: <http://www.bibliotecaflorestal.ufv.br/handle/123456789/18158>. Acesso em: 10 ago. 2021.

SANTOS, P. L.; FERREIRA, R. A.; ARAGÃO, A. G.; AMARAL, L. A.; OLIVEIRA, A. S. Estabelecimento de espécies florestais nativas por meio de semeadura direta para recuperação de áreas degradadas. **Revista Árvore**, v. 36, n. 2, p. 237-245, 2012. DOI: 10.1590/S0100-67622012000200005.

SANTOS, L. M. **Restauração de campos ferruginosos mediante resgate de flora e uso de topsoil no quadrilátero ferrífero, Minas Gerais**. 2010. 128 p. Tese (Doutorado em Biologia Vegetal) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

SCOLES-SCIULLA, S. J.; DEFALCO, L. A. Seed reserves diluted during surface soil reclamation in eastern Mojave Desert. **Arid Land Research and Management**, v. 23, p. 1-13, 2009. DOI: 10.1080/15324980802598698.

SILVA, F. F.; RESENDE, A. S.; SANTOS, T. A.; CHAER, G. M. Use of cardboard disks for crowning seedlings in reforestation. **Floresta e Ambiente**, v. 25, e20160261, 2018. DOI: 10.1590/2179-8087.026116.

SILVA, F. F.; SANTOS, T. A.; JESUS, E. C.; CHAER, G. M. Characterization of rhizobia and arbuscular mycorrhizal fungi in areas impacted by gravel mining in Brazil. **Revista Caatinga**, v. 32, n. 4, p. 995-1004, 2019. DOI: 10.1590/1983-21252019v32n416rc.

SILVA, K. A.; MARTINS, S. V.; MIRANDA NETO, A.; CAMPOS, W. H. Semeadura direta com transposição de serapilheira como metodologia de restauração ecológica, **Revista Árvore**, v. 39, n. 5, p. 811-820, 2015a. DOI: 10.1590/0100-67622015000500004.

SILVA, R. R. P.; OLIVEIRA, D. R.; ROCHA, G.P.E. da; VIEIRA, D. L. M. Direct seeding of Brazilian savanna trees: effects of plant cover and fertilization on seedling establishment and growth. **Restoration Ecology**, v. 23, p. 393-401, 2015b. DOI: 10.1111/rec.12213.

SILVA, R. R. P., VIEIRA, D. L. M. Direct seeding of 16 Brazilian savanna trees: responses to seed burial, mulching and an invasive grass. **Applied Vegetation Science**, v. 20, p. 410-421, 2017. DOI: 10.1111/ijlh.12426.

VIANI, R. A. G.; NAVE, A. G.; RODRIGUES, R. R. Transference of seedlings and aloctone young individuals as ecological restoration methodology. In: RODRIGUES, R. R.; MARTINS, S. V.; GANDOLFI, S. (eds.). **High diversity forest restoration in degraded areas: methods and projects in Brazil**. Nova York: Nova Science Publishers, 2006. p. 145-170.

CAPÍTULO 3

FERRAMENTAS E INDICADORES DE MONITORAMENTO DA RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS NA CAATINGA

*Fernando Lima Aires Gonçalves | Frederico Santos Machado
Ivanil Ribeiro Cruz | Renan Caldas Correia
Jeferson Luiz Dalladona Dombroski | Rejane Tavares Botrel
Erick Daniel Gomes da Silva | Izar Aximoff
Guilherme Montandon Chaer*

Introdução

O monitoramento da recuperação de áreas degradadas (RAD) é fundamental para avaliar se as intervenções realizadas estão atendendo aos objetivos e expectativas previstos em projeto e, caso necessário, indicar ações corretivas ou que visem otimizar o processo de recuperação do ambiente. Além disso, tem como objetivo fiscalizar o alcance de metas estabelecidas em contrato com empresas prestadoras do serviço ou ainda comprovar a execução da RAD junto a agências públicas de meio ambiente.

Os indicadores utilizados no monitoramento da RAD pouco variam em razão do tipo de ambiente e do tipo de intervenção efetuada. Geralmente são verificadas a sobrevivência e as taxas de crescimento das espécies vegetais introduzidas ou regenerantes, indicadores de diversidade biológica (principalmente

da vegetação) e mudanças na qualidade do solo ou substrato da área. Mazón et al. (2020) revisaram os indicadores ecológicos, sociais e econômicos de 84 artigos científicos referentes a projetos executados na América Latina e na região do Caribe. Os mais utilizados nesses estudos foram a diversidade de espécies (73%), características físicas como estrutura da vegetação (54%) e funções ecológicas como propriedades físico-químicas do solo (51%).

As informações obtidas por intermédio do monitoramento permitem identificar a trajetória de médio e longo prazos da recuperação do ambiente, além da necessidade de intervenções como replantios, controle de pragas, correção de deficiências nutricionais e controle de pontos de erosão. Com a correção dos problemas, otimiza-se o processo de recuperação da área.

As ferramentas ou métodos usados para obter os indicadores podem variar em função da disponibilidade e da qualificação da mão de obra e do acesso a equipamentos e tecnologias. Por exemplo, medidas de sobrevivência e desempenho de plantas introduzidas em campo podem ser obtidas tanto diretamente, pelo inventário tradicional realizado em campo, quanto indiretamente, pelo processamento digital de imagens aéreas obtidas por veículos aéreos não tripulados (Vants), popularmente conhecidos como drones, ou por satélites capazes de produzir imagens de alta resolução. Enquanto a precisão da medição direta tende a ser maior, são indiscutíveis as vantagens proporcionadas pelos métodos indiretos em termos de ganho de escala e redução de custos e do tempo de execução.

Nesse capítulo são detalhados os principais indicadores utilizados no monitoramento da recuperação de áreas degradadas e apresentados exemplos de uso de drones e técnicas de processamento digital de imagens para monitoramento da RAD. Todos os estudos de caso apresentados referem-se a monitoramentos realizados em áreas degradadas por atividades de exploração e produção de petróleo e gás em terra no bioma Caatinga.

Monitoramento da qualidade do solo⁵

O planejamento das ações de RAD em determinada área passa necessariamente pelo conhecimento prévio das condições químicas e físicas do solo, a fim de mitigar, quando possível, fatores que podem dificultar ou comprometer o estabelecimento de espécies vegetais no ambiente (Araújo et al., 2012, Rocha et al., 2015). Por exemplo, em áreas que foram submetidas a mineração, é comum a compactação do solo em locais que sofreram tráfego de máquinas pesadas e uma baixa fertilidade do material de subsolo a ser revegetado. Nesses casos, a descompactação do solo com subsoladores e a aplicação de corretivos e fertilizantes geram condições mais adequadas para estabelecer e desenvolver as plantas que serão introduzidas.

Outra questão importante está relacionada à presença de sais em elevadas quantidades no ambiente. A restrição hídrica, comum em ambientes semiáridos, em conjunto à toxidez promovida pelo excesso de sais, desacelera processos físico-químicos e biológicos, afetando a germinação e o crescimento das mudas (Ribeiro et al., 2017). A elevada salinidade do solo da Caatinga, ocasionada por baixa precipitação e alta taxa de evaporação, pode perturbar as funções fisiológicas das plantas. Assim, mesmo considerando espécies florestais nativas adaptadas ao meio, a salinidade pode impedir a sobrevivência em situações extremas (Ribeiro et al., 2017, Gonçalves et al., 2020).

Apesar de muito relevantes para o diagnóstico e a correção do solo anteriormente aos plantios, o emprego de análises tradicionais de fertilidade para fins de monitoramento da RAD pode ser pouco eficiente em mostrar mudanças no ambiente decorrentes das intervenções. Essas análises podem, entretanto, ser

⁵ Tecnicamente, solo difere de substrato por possuir horizontes formados por processos pedogenéticos. Quando o solo de determinada área tem seus horizontes superficiais e subsuperficiais removidos, como em atividades de mineração em cavas abertas, ou soterrado por aterramento, o material mineral em superfície passa a ser denominado “substrato”. Como ações de RAD podem ocorrer tanto em áreas com solo como com substrato, para efeito simplificador, trataremos nesta publicação qualquer denominação a solo ou substrato apenas como solo.

realizadas durante a fase de monitoramento, visando indicar, eventualmente, a necessidade de novas correções e fertilizações do solo para promover o melhor desenvolvimento da vegetação (Mitchell et al., 2000). Assim, o monitoramento da qualidade do solo em médio e longo prazos deve focar em indicadores que expressem o avanço da recolonização do ambiente pelas diferentes formas de vida introduzidas ou colonizadoras. Por intermédio do crescimento das plantas e do *input* de carbono no solo promovido por estas, seja por exsudatos radiculares ou deposição de serapilheira, reiniciam-se os processos de decomposição, ciclagem de nutrientes e de formação da matéria orgânica do solo, influenciando ainda a retenção de água. Esses processos, por sua vez, são protagonizados pela macro, meso e microfaunas do solo, que, com o avanço da RAD e do aumento da complexidade vegetal, também se tornam mais abundantes e biodiversas. Assim, o acúmulo de C e a atividade biológica no solo serão tão mais intensos quanto mais eficiente ou avançado estiver o processo de RAD.

Os indicadores mais comumente usados para monitorar a qualidade do solo em áreas em processo de RAD incluem análises quantitativas (massa seca) e qualitativas (teores de nutrientes) da serapilheira acumulada (Cavalcante et al., 2019, Ferreira et al., 2019), análise dos teores de C e N totais do solo, quantificação da biomassa microbiana, da diversidade da macro e mesofauna do solo (Lima et al., 2017, Machado et al., 2018, Silva et al., 2018) e densidade do solo (Rinot et al., 2019, Silva et al., 2020).

Indicadores bioquímicos, a exemplo de medidas de atividade enzimática do solo, são os mais sensíveis para detectar melhorias na qualidade do substrato, especialmente os relacionados ao retorno de processos ligados à formação de matéria orgânica e de ciclagem de nutrientes (Tótola; Chaer, 2011). Em agosto de 2020, a Embrapa lançou a tecnologia Bioas, que envolve a análise e interpretação de dois bioindicadores, as enzimas beta-glicosidase e arilsulfatase, respectivamente relacionadas à ciclagem de carbono e enxofre no solo (Bioas, 2020). A análise desses bioindicadores está sendo gradualmente implementada

em laboratórios de análise de solo distribuídos na maior parte do Brasil. Apesar de a tecnologia atualmente estar disponível apenas para o bioma Cerrado e para culturas de grãos, estão em andamento pesquisas que possibilitarão sua aplicação em diversas outras regiões e culturas do País. Quando se tornar disponível para a Caatinga, sua aplicação no monitoramento da recuperação das áreas degradadas será de grande utilidade na identificação da qualidade do processo de recuperação promovido por diferentes estratégias.

A coleta de amostras para a análise dos indicadores de solo pode ser realizada a cada dois anos, devendo ocorrer preferencialmente ao final do período de chuvas da região (pode ser concomitante aos inventários da vegetação). Para cada área ou subárea, deve-se coletar ao menos oito amostras simples para formar uma amostra composta representativa. Subáreas correspondem a condições particulares, como locais planos e bem drenados, com tendência a acúmulo de água das chuvas ou ainda taludes ou outras condições particulares e representativas da área. Muitas vezes, o padrão de desenvolvimento da vegetação será diferente em cada subárea, o que ajudará a definir os limites. As amostras de solo podem ser coletadas nas camadas de 0 a 5 cm ou de 0 a 10 cm, devendo ser posteriormente peneiradas, embaladas e identificadas. Para amostragem de serapilheira, podem ser construídos gabaritos com canos de PVC, no formato quadrado, com 0,5 m de lado. Esses gabaritos são então lançados aleatoriamente em diferentes pontos da área e a serapilheira interna ao gabarito, amostrada. Detalhes do processamento e do armazenamento das amostras dependem das metodologias de análise a serem empregadas e devem ser observadas caso a caso.

Monitoramento da vegetação introduzida

O monitoramento do crescimento e da sobrevivência das plantas introduzidas é uma etapa fundamental para avaliar o sucesso das ações de RAD implementadas em determinado local. Além disso, o monitoramento pode fornecer informações sobre a adaptação tanto de cada espécie introduzida na área quanto do conjunto mais adequado de espécies (Lima et al., 2015). Essas informações são relevantes para o contínuo ajuste na composição das espécies a serem introduzidas em áreas com características similares.

Em geral, espécies arbóreas e arbustivas nativas da região são introduzidas na área degradada via plantio de mudas, embora isso possa também ocorrer por meio de semeadura direta de sementes coletadas em áreas preservadas nas proximidades ou da regeneração natural (Santos et al., 2012). Principalmente a sobrevivência e o crescimento das espécies de porte arbóreo e arbustivo introduzidas devem ser monitorados. Naturalmente, altas taxas de crescimento e sobrevivência são desejáveis para o sucesso da recuperação, pois permitem a revegetação da área degradada em menores tempo e custo. O lento recobrimento da área com vegetação irá alongar o processo de recuperação, aumentando o custo final do projeto, por exemplo, com a aquisição de mudas para replantios e horas adicionais para realizar atividades de manutenção (Gonçalves, 2020).

Projetos de RAD em áreas degradadas da Caatinga podem ser monitorados anualmente, com as avaliações ocorrendo principalmente ao final das estações de chuva (maio a junho). Avaliações durante a estação seca (agosto a dezembro) também podem ser realizadas, especialmente para conhecer o comportamento de cada espécie introduzida na situação de déficit hídrico. Na estação seca, a maioria das espécies de porte arbóreo ou arbustivo apresenta um mecanismo fisiológico relacionado a perda total ou parcial das folhas (espécies caducifólias) de sua copa, enquanto na estação chuvosa recuperam toda a folhagem. Entretanto, não é recomendável que o monitoramento seja realizado apenas no período seco, pois nesse período é difícil uma avaliação precisa da sobrevivên-

cia dos indivíduos ou a tomada de medidas de crescimento devido à ausência de folhas em grande parte das espécies.

Outra particularidade do monitoramento da vegetação na Caatinga refere-se ao fato de muitas das espécies arbóreas apresentarem copas baixas, além de espinhos e acúleos. Esses fatores dificultam o deslocamento das equipes em campo e aumenta o tempo de execução das atividades de medição das plantas (Figura 1).



Foto: Fernando Lima Aires Gonçalves

Figura 1. Medição de crescimento da espécie *Mimosa tenuiflora* (Willd.) Poir., a qual apresenta espinhos e copa próxima ao solo, dificultando o trabalho de medição e caminhar na área (jazida de piçarra em Assú, RN).

Geralmente são monitorados indicadores de sobrevivência e de crescimento por espécie e calculada a média destes indicadores por área (Chaer et al., 2010). Medidas de crescimento podem ser obtidas com mensurações da altura total, da área de copa e do diâmetro de tronco ao nível do solo (DAS) ou do diâmetro de tronco à altura do peito (DAP), quando possível (é comum espécies arbóreas da Caatinga realizarem abertura de copa a poucos centímetros do solo, o que impede a tomada de medidas de DAP). Essas avaliações podem ser realizadas, por exemplo, com auxílio de vara telescópica ou trena (Figura 2).



Fotos: Guilherme Montandon Choer

Figura 2. Mensuração da altura (foto da esquerda) e área de copa (foto da direita) da espécie *Enterolobium timbouva* Mart. com auxílio de trena em área degradada, na região de Assú, RN.

A taxa de crescimento em altura pode ser obtida pela subtração do valor da altura encontrada na última medição pelo da primeira medição. Este resultado é dividido pelo tempo, em dias, entre as duas medições e multiplicado por 30 para que se obtenha a taxa de crescimento expressa em cm/mês, conforme a fórmula abaixo:

$$\text{Taxa de crescimento} = \left(\left(\frac{(\text{Altura média final} - \text{Altura média inicial})}{(\text{Data tf} - \text{Data ti})} \right) * 30 \right)$$

Em que:

Altura média inicial: altura em centímetros mensurada após o plantio;

Altura média final: altura em centímetros mensurada no último período de monitoramento;

Data ti: tempo em dias decorrentes desde o plantio até a primeira mensuração;

Data tf: tempo em dias decorrentes desde o plantio até a última mensuração.

Para obter a variável sobrevivência, deve ser contabilizado o número de indivíduos vivos durante os inventários de campo. O número de indivíduos vivos é então usado para calcular a taxa de sobrevivência, como demonstrado pela fórmula abaixo:

$$\text{Taxa de sobrevivência} = \left\{ \frac{(\text{Ns}) * 100}{\text{Np}} \right\}$$

Em que:

Ns: número de plantas sobreviventes até a última avaliação;

Np: número de mudas plantadas no início do projeto.

A variável área de copa também é um bom parâmetro de monitoramento, uma vez que indica se as espécies têm potencial para rápido recobrimento do solo, característica desejável em locais degradados e com solo geralmente exposto, pois as copas podem servir de barreira protetora contra o impacto das gotas de chuva no solo, diminuindo o potencial de erosão da área. Esse recobrimento também serve como regulador da intensidade luminosa e proporciona temperaturas mais amenas para as espécies mais sensíveis.

A mensuração da copa pode ser feita tomando-se medidas do diâmetro de copa em duas direções perpendiculares, como norte-sul e leste-oeste. Para transformar essas medidas em área de copa é utilizada a fórmula de cálculo de área da elipse:

$$\text{Área de copa} = \left\{ \frac{\frac{(M\ 1)}{2} * \frac{(M\ 2)}{2}}{100} \right\}$$

Em que:

M1: diâmetro da copa em centímetros na direção 1;

M2: diâmetro da copa em centímetros na direção 2.

Monitoramento da regeneração natural

Regeneração natural (RGN) pode ser definida como um conjunto de processos que promovem o estabelecimento de plantas em áreas naturais ou antropizadas sem que haja intervenção humana. Em áreas degradadas, a RGN é um fator que pode auxiliar a recuperação do ambiente, atuando em paralelo às intervenções humanas como o plantio de mudas de espécies nativas. Bons planejamento e execução das intervenções para RAD também podem favorecer e acelerar a RGN, por exemplo, isolando a área de animais e evitando a ocorrência de queimadas. Ademais, o crescimento e o desenvolvimento de espécies nativas introduzidas por intermédio do plantio de mudas podem retroalimentar a RGN, pois com o crescimento das árvores criam-se condições favoráveis à atração de animais dispersores ou condições microclimáticas e melhorias no solo que irão favorecer a ocorrência da RGN. Monitorar a ocorrência e a intensidade da regeneração natural pode fornecer, portanto, informações sobre o ritmo de recuperação da área degradada.

A RGN pode ser monitorada através de avaliações da fitossociologia e estrutura horizontal das espécies de ocorrência espontânea nas áreas em recuperação. A análise fitossociológica da regeneração natural e de sua estrutura horizontal ajuda a conhecer quais espécies estão colonizando a área, sendo quantificado o percentual de recobrimento dos indivíduos de porte herbáceo, arbustivo e arbóreo. Essas informações podem, por exemplo, identificar se as espécies regenerantes são nativas da região ou predominantemente exóticas, situação que pode levar à necessidade de ações de controle.

A estrutura horizontal da RGN é baseada na frequência e na dominância (cobertura) da vegetação espontânea. A frequência se refere à ocorrência de um determinado indivíduo nas áreas amostrais e pode ser classificada como absoluta ($FreqAb_i$), que se refere à probabilidade de uma unidade amostral conter uma determinada espécie, e relativa ($FreqRel_i$), que indica a frequência da mesma espécie em comparação com as demais de ocorrência na área.

Também pode ser calculada a dominância relativa ($CobRel_i$), que representa o espaço que determinada espécie ocupa em cada local. Com esses dois índices, $FreqRel_i$ e $CobRel_i$, é possível gerar o índice de cobertura (IC) para definir a importância da espécie i na comunidade estudada. Os levantamentos de campo da RGN devem, sempre que possível, identificar os indivíduos por seu nome vulgar, nome científico e família botânica. Coletas de material botânico, juntamente a registros fotográficos, podem auxiliar na identificação dos indivíduos amostrados em campo. Essas informações são compiladas em planilha eletrônica para que possam ser analisadas e geradas informações de cada espécie encontrada.

Uso de drones para monitoramento da RAD

O sensoriamento remoto consiste na obtenção de imagens e dados da superfície terrestre através do uso de sensores que registram a energia refletida/emitada pelas superfícies monitoradas. Várias ferramentas de sensoriamento remoto podem facilitar o trabalho de monitoramento da RAD. Uma vez bem calibrados, os métodos de sensoriamento remoto permitem maior rapidez e menor custo para realizar os monitoramentos.

O recente avanço da tecnologia de vants, popularmente conhecidos por drones, possibilitou o avanço nas operações de muitas empresas, pois garantiu aumento na eficiência de custo e tempo, obtendo e processando os dados de campo com mais precisão e garantindo uma tomada de decisão mais assertiva. Ela também possibilitou monitoramentos mais frequentes, mesmo em locais remotos, diminuindo o risco para as equipes de campo (Faustino, 2018).

Drones acoplados a sensores de alta resolução espacial permitem gerar ótimos resultados com baixo custo operacional, obtendo imagens bem detalhadas, que permitem indicar o progresso da recuperação das áreas degradadas (Cândido; Silva; Filho, 2015). Na área florestal, a aplicação dos drones é bem variada e tem sido empregada para obter a taxa de cobertura arbórea em projetos

de reflorestamento, avaliar a biodiversidade (Getzin et al., 2012) e levantamentos cartográficos e topográficos (Getzin et al., 2014), permitindo avaliar grandes áreas com menor esforço de campo (Machado et al., 2018).

Na Caatinga, onde os plantios podem apresentar alta densidade de indivíduos de porte baixo e com presença de espinhos (Figura 3), o uso de drones pode muitas vezes ser a única alternativa viável de monitoramento da vegetação, pois permite que o operador guie o equipamento sem adentrar as áreas plantadas. Dentre as principais aplicações dos drones na RAD podem ser citados o monitoramento da taxa de cobertura do solo com vegetação, a identificação de plantas mortas e o cálculo da taxa de sobrevivência de plantios, a identificação de ocorrência e a intensidade da regeneração natural na área, dentre outras. No tópico seguinte é descrito em mais detalhes como é obtido o indicador “taxa de cobertura do solo” com o uso de drone.



Foto: Fernando Lima Aires Gonçalves

Figura 3. Vista de local em recuperação contendo indivíduos arbóreos de porte baixo e com espinhos que dificultam o trânsito e medições na área.

Obtenção da taxa de cobertura do solo com o uso de drones

Os voos para captura de imagens por drones geralmente são feitos de forma automatizada, com uso de um aplicativo compatível com o modelo do equipamento. Há vários disponíveis para Android e iOS compatíveis com uma grande variedade de drones. Como exemplos, Drone Deploy, DJI Ground Station PRO, Skydrone, Precision Flight e Pix4D Capture (Pix4D S.A., Prilly, Switzerland). Todos são de uso gratuito para planejamentos e execução de voos.

No exemplo ora apresentado foi utilizado o aplicativo Pix4D Capture para iOS, utilizando os seguintes parâmetros: grid para mapas 2D, 30 m de altitude de voo, ângulo da câmera a 90 graus, sobreposição de imagens de 80% e velocidade do drone rápida. As imagens georreferenciadas foram processadas utilizando o software Agisoft PhotoScan Professional Edition 1.2.3 (Agisoft LLC, St. Petersburg, Rússia). Esse processamento é realizado em seis etapas (1 - adição das fotos no programa; 2 - alinhamento das fotos gerando uma nuvem de pontos; 3 - construção da nuvem densa de pontos; 4 - construção do modelo; 5 - construção do mapa 3D texturizado; 6 - elaboração do ortomosaico). O resultado é a obtenção de apenas uma imagem georreferenciada de toda a área monitorada.

A construção dos mapas de taxa de cobertura pode ser realizada pelo método de fotointerpretação, por intermédio do software livre QGIS (Equipe de Desenvolvimento QGIS, 2020. Sistema de Informações Geográficas QGIS. Projeto da Fundação Geoespacial de Código Aberto).⁶ Devem ser definidas duas classes para a confecção dos mapas, delimitadas visualmente, a partir da construção de vetores (Cândido et al., 2015). As classes criadas são área coberta (polígonos confeccionados a partir da copa das árvores) e área descoberta (polígonos confeccionados a partir das áreas que não foram sobrepostas pela copa das árvores).

⁶ <http://qgis.osgeo.org>

Ao final da construção dos polígonos pode-se somar a área dos polígonos, com ou sem cobertura, para saber a porcentagem da área sobreposta pela copa das espécies plantadas e a regeneração natural em relação à área total. A área dos polígonos pode ser obtida utilizando a ferramenta calculadora de campo, presente no software QGIS. No exemplo da Figura 4, é apresentada a imagem pós-processamento, mostrando os mosaicos de cobertura do solo de quatro tratamentos usados para reflorestamento de uma jazida de piçarra em Pendências, RN. As imagens foram obtidas cerca de dois anos após o plantio de mudas com diferentes arranjos de espécies (Gonçalves, 2020).



Figura 4. Delimitação da área de cobertura em quatro áreas, 24 meses após plantios contendo distintos arranjos de espécies em Pendências, RN.

Fonte: Gonçalves (2020).

Realidade virtual como ferramenta para caracterização e monitoramento de áreas degradadas e educação ambiental

A realidade virtual (RV) é uma tecnologia de interface entre um ou mais usuários e um sistema operacional através de recursos gráficos 3D ou imagens 360 graus, cujo objetivo é criar a sensação de presença, usualmente conhecida como imersão, em um ambiente virtual similar ao real. Segundo Russo et al. (2004), a RV teve suas origens na década de 1960. No entanto, só ganhou força na década de 1990, quando o avanço tecnológico propiciou condições para execução da computação gráfica interativa. Desde então, várias áreas do conhecimento vêm utilizando tal tecnologia.

Apesar de a RV normalmente ser vista como tendo potencial nas áreas de entretenimento e educativa, seu uso tem se expandido rapidamente como ferramenta técnica, especialmente na área de realidade aumentada. Assim, já existe tecnologia disponível para uso nas mais diversas áreas da indústria, comércio e prestação de serviços, permitindo interações não presenciais e a redução da necessidade de deslocamento de pessoas, demandas prementes dos dias atuais.

Em 2018, o Centro de Pesquisa da Petrobras (Cenpes), em parceria com a Universidade Federal Rural do Semi-Árido (Ufersa), FGD e a Mapeio Inovação e Tecnologia elaboraram uma aplicação de RV voltada à recuperação ambiental denominada “Caatinga 360”. O Caatinga 360 é uma plataforma digital multimídia⁷ que permite ao usuário acesso a uma visita imersiva, virtual e interativa em três tipos de vegetação do bioma Caatinga, na região do Oeste Potiguar, em dois períodos distintos (seco e chuvoso) (Figura 5). A plataforma foi criada para propiciar uma alternativa não presencial de monitoramento da recuperação ambiental de locações operacionais desativadas na indústria de petróleo em

⁷ <https://projetoCaatinga.ufersa.edu.br/caatinga-360/>

processo de descomissionamento. Além disso, permite o acesso virtual a áreas preservadas, que tradicionalmente possuem difícil acesso presencial, o que limita seu uso como referência em projetos de recuperação.



Figura 5. Tela inicial da plataforma “Caatinga 360” com marcadores de navegação para os períodos seco e chuvoso.

Fonte: Caatinga 360.

O “Caatinga 360” oferece uma experiência lúdica e agradável, com potencial para obter informações técnicas sobre diversos parâmetros de qualidade ambiental usados como critérios de quitação com órgãos ambientais. Entre eles, densidade de indivíduos, diversidade, equidade, riqueza, altura, infestação de gramíneas, erosão e cobertura do solo. Há ainda a vantagem adicional do registro fotográfico imersivo dos ambientes, a possibilidade de acesso virtual de especialistas a essas áreas e revisão dos levantamentos em qualquer local ou época.

Esta tecnologia pode ser aplicada no monitoramento da recuperação ambiental desta e de outras indústrias e em várias outras regiões ou ecossistemas brasileiros. De forma adicional, a plataforma pode ser usada como ferramenta de educação ambiental. Portanto, o “Caatinga 360” pode promover maior conhecimento sobre o bioma entre aqueles fisicamente distantes, contribuindo para a valorização e a valoração dos ecossistemas associados.

A RV do “Caatinga 360” é gerada a partir de fotografias panorâmicas esféricas (360 graus), com áudio incorporado, denominadas “cenas”, obtidas em locais relevantes, georreferenciados e demarcados. Na maioria dos locais são gravadas duas “cenas”, uma no auge do período chuvoso (final de junho) e outra no auge do período seco (final de novembro) (Figura 6), o que permite perceber o alto contraste ambiental entre essas épocas do ano, na Caatinga.

Cada “cena” é montada a partir de seis fotografias digitais convencionais ortogonais, sendo quatro horizontais voltadas para os pontos cardeais, e duas verticais opostas, todas com erro relativo de posicionamento inferior a 5 graus, obtidas em resolução de 20 megapixel (UHD - ultra alta resolução) com câmeras profissionais tipo DSLR. Essas imagens são combinadas digitalmente para obtenção das “cenas”.

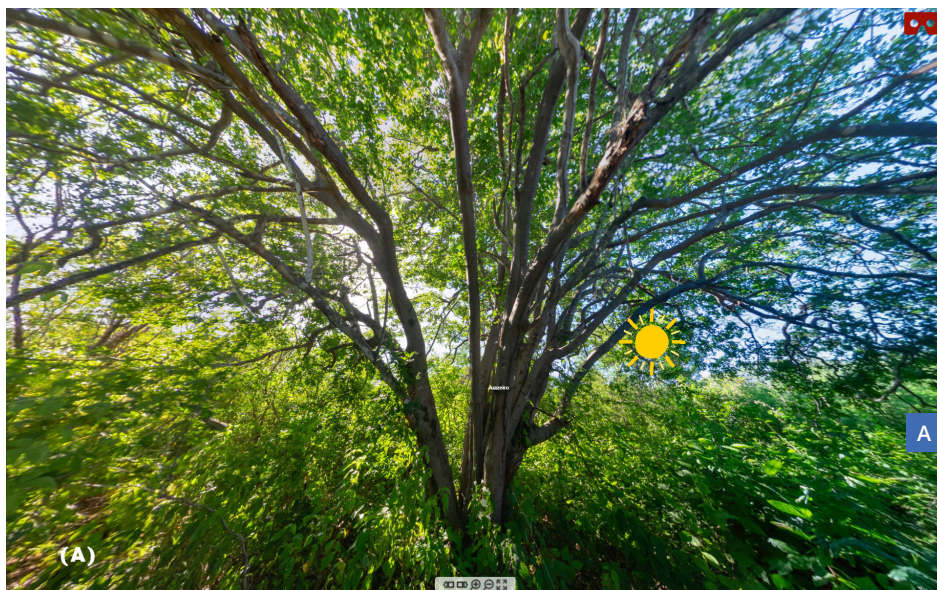


Figura 6. Cenas da Caatinga Arbórea na Fazenda Experimental Rafael Fernandez, Mossoró, RN, durante o período chuvoso (A) e seco (B), com marcadores de navegação para mudança de período e de cena. Cenas obtidas a partir do mesmo ponto tendo como destaque na imagem um indivíduo da espécie *Sarcomphalus joazeiro* (Mart.) Hauenschild (juazeiro). Notar a diferença na vegetação de porte herbáceo, a qual se torna exuberante durante o período das chuvas (A). Fonte: Caatinga 360.

As cenas possuem botões padrão de navegação em uma barra na parte inferior:

- » Seta para direita – ferramenta de navegação que serve para avançar para a próxima fotografia;
- » Seta para esquerda – ferramenta de navegação que serve para voltar à fotografia anterior;
- » Zoom +/- – ferramenta de navegação que serve para aproximar/afastar a visualização da cena;
- » Setas multidirecionais – ferramenta de navegação que serve para a exibição em tela cheia;
- » Óculos – ferramenta de navegação que permite que o usuário visualize o passeio através de óculos de realidade imersiva.

Para aprimorar a experiência do usuário e a interatividade do passeio virtual, foram incorporados à plataforma marcadores de navegação cartunísticos criados por artista local:

- » Sol – marcador que quando pressionado faz com que o usuário visualize o mesmo ponto durante a época da seca;
- » Nuvem – marcador que quando pressionado faz com que o usuário visualize o mesmo ponto durante a época chuvosa;
- » Pomba campestre “Avoante” – marcador que quando pressionado, faz com que o usuário prossiga para a próxima foto.

Marcadores também foram colocados no tronco das principais espécies encontradas durante a captação das imagens, como o juazeiro, catingueira, jucá, jurema-de-embira e carnaúba. Estes marcadores, quando pressionados, abrem uma caixa de texto com informações relevantes destas espécies.

Além das fotografias, dos marcadores e das ferramentas de navegação, áudios com a biodiversidade regional são captados e incorporados ao “Caatinga 360”, fazendo com que a imersão seja amplificada. Na cena inicial, um narrador deseja boas-vindas e emite instruções básicas sobre o passeio virtual.

Em qualquer uma das “cenas” é possível visualizar o solo e observar a presença ou ausência de serapilheira, se possui rachaduras ou indícios de erosão, além da cor característica. Ainda é possível observar se há vegetação herbácea ou de sub-bosque e até mesmo identificar se há plantas indesejáveis no local. Ao movimentar a imagem na direção do horizonte, é possível observar a densidade, a diversidade, o diâmetro de troncos de espécies arbóreas e arbustivas, as folhas e o vigor das plantas. Os principais indivíduos são identificados nas “cenas”, sendo possível observar algumas características, como presença de espinhos e acúleos, cor e textura da casca, entre outros aspectos. Ao direcionar o foco para cima da “cena”, nota-se a presença de outras plantas e a altura dos estratos superiores, além da avaliação da cobertura da copa.

Os parâmetros visuais acima mencionados são critérios de identificação de espécies e de caracterização de áreas de referência, sendo também relevantes indicadores qualitativos do grau de recuperação ambiental de uma área degradada.

O “Caatinga 360” pode ser acessado livremente em qualquer navegador de internet, sendo a melhor experiência obtida em dispositivos estereoscópicos (óculos de realidade virtual).⁸

⁸ Acesse: <https://caatinga360.ufersa.edu.br/>

Considerações finais

Este capítulo objetivou apresentar, de forma não exaustiva, indicadores e ferramentas que podem ser utilizados no monitoramento da recuperação de áreas degradadas, com ênfase em ambientes do Semiárido brasileiro. Até poucos anos, os monitoramentos da RAD eram realizados exclusivamente por métodos de medição direta em campo. Apesar de vários indicadores importantes para o monitoramento continuarem a demandar coletas e medições diretas, o desenvolvimento contínuo de ferramentas (equipamentos e softwares) de sensoriamento remoto fará com que os monitoramentos diretos tradicionais sejam gradualmente substituídos por monitoramentos remotos, por razões de economicidade, rapidez e possibilidade de abranger áreas maiores ou de difícil acesso. Certamente, com o avanço das tecnologias de sensoriamento remoto, em um futuro não muito distante será possível obter remotamente informações precisas de outras variáveis importantes para o monitoramento, que atualmente são possíveis de se obter apenas diretamente em campo. Dentre estas, a identificação e a distribuição de espécies, a mensuração do crescimento e do vigor de plantas, o reconhecimento de padrões de regeneração natural, dentre tantas outras informações. Portanto, essas ferramentas e métodos têm muito a contribuir para o melhor monitoramento das áreas em recuperação, facilitando e aumentando a precisão na tomada de decisões e permitindo alcançar melhores resultados na RAD.

Referências

- ARAÚJO, E. A.; KER, J de. C.; NEVES, J. C. L.; LANI, J. L. Qualidade do Solo: conceitos, indicadores e avaliação. **Pesquisa Aplicada & Agrotecnologia**, v. 5 p. 187-196, 2012. DOI 10.5777/paet.v5i1.1658.
- BioAS. Tecnologia de Bioanálise de Solo. Brasília: Embrapa Cerrados, 2020. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-solucoes-tecnologicas/-/produto-servico/6047/bioas--tecnologia-de-bioanalise-de-solo->. Acesso em: 18 ago. 2021.
- CÂNDIDO, A. K. A. A.; SILVA, N. M.; PARANHOS FILHO, A. C. Imagens de alta resolução espacial de veículos aéreos não tripulados (VANT) no planejamento do uso e ocupação do solo. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 38 p. 147-156, 2015. DOI: 10.11137/2015_1_147_156.
- CAVALCANTE, A. E. D. Q. M.; SANTOS, R. V. dos; JUSTINO, S. T. P.; SOUSA SILVA, R. P de S. Emprego da serapilheira em coprodutos de mineração e crescimento inicial da catingueira (*Poincianella pyramidalis* (Tul.) LP Queiroz). **Desafios - Revista Interdisciplinar da Universidade Federal do Tocantins**. v. 6 n. 1, p. 23-30, 2019. DOI: 10.20873/uft.23593652201961p23.
- FAUSTINO, R. Melhoria na tomada de decisão com imagens de RPAS em tempo real. In: RIO OIL & GAS EXPO AND CONFERENCE, 19.; 2018, Rio de Janeiro. **Transformando desafios em oportunidades: Trabalhos técnicos 2018**. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro do Petróleo, 2018. 7p. Disponível em: <https://www.ibp.org.br/rog2018-trabalhos-tecnicos/>. Acesso em: 18 ago. 2021.
- FERREIRA, C. D.; SOUTO, J. S.; SOUTO, P. C.; SALES, F. D. C. V.; BARROSO, R. F.; SOUZA JUNIOR, C. M. P de. Deposição, acúmulo e decomposição de serapilheira em área preservada de caatinga. **Agrarian**, v. 12, n. 44, p. 174-181, 2019. DOI: 10.30612/agrarian.v12i44.8212.
- GETZIN, S.; NUSKE, R. S.; WIEGAND, K. Using Unmanned Aerial Vehicles (UAV) to quantify spatial gap patterns in forests. **Remote Sensing**, v. 8, n. 6, p. 6988-7004, 2014. DOI: 10.3390/rs6086988.
- GETZIN, S.; WIEGAND, K.; SCHÖNING, I. Assessing biodiversity in forests using very high-resolution images and unmanned aerial vehicles. **Methods in Ecology and Evolution**, v. 2, n. 3 p. 397-404, 2012. DOI: 10.1111/j.2041-210X.2011.00158.x.

GONÇALVES, F. L. A. **Estratégias de recuperação de áreas degradadas pela exploração e produção de petróleo e gás natural na Caatinga**. 2020. 114 p. Tese (Doutorado em Ciências Ambientais e Florestais) - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Seropédica.

GONÇALVES, M. D. P. M.; FELICIANO, A. L. P.; SILVA, A. de; P.; SILVA, L. B. da; SILVA, K. M. da; SILVA JÚNIOR, F. S da.; SILVA, M. I. O. da. Influência de diferentes tipos de solos da Caatinga na germinação de espécies nativas. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 1, p. 1216-1226, 2020. DOI: 10.34117/bjdv6n1-085.

LIMA, K. D. R., CHAER, G. M., ROWS, J. R. C, MENDONÇA, V., RESENDE, A. S. Seleção de espécies arbóreas para revegetação de áreas degradadas por mineração de piçarra na Caatinga. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 28, n. 1, p. 203-213, 2015. Disponível em: <https://periodicos.ufersa.edu.br/index.php/caatinga/article/view/3644>. Acesso em: 11 ago. 2021.

LIMA, K. D. R.; CAMARA, R.; CHAER, G. M.; PEREIRA, M. G.; RESENDE, A. S. Soil fauna as bioindicator of recovery of degraded areas in the Caatinga biome. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 30, n. 2, p. 401-411, 2017. DOI: 10.1590/1983-21252017v30n215rc.

MACHADO, D. D. N.; COSTA, E. C.; PEDRON, L.; BOSCARDIN, J.; MACHADO, L. M.; FLECK, M. D.; SANTANA, N. A. Soil macrofauna as indicator of environmental recovery in a mining area. **Floresta e Ambiente**, v. 25, n. 4, e20170769, 2018. DOI: 10.1590/2179-8087.170769.

MACHADO, F. S.; CRUZ, I. R.; PAES, J. E. S.; SANTOS, J. L. B.; NASCIMENTO, M. C. P.; SOARES, O. D.; VIDAL, G. M. Utilização de drone para a caracterização de uma restinga em recuperação após a instalação de gasoduto In. RIO OIL & GAS EXPO AND CONFERENCE, 19.; 2018, Rio de Janeiro. **Transformando desafios em oportunidades**: Trabalhos técnicos 2018. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro do Petróleo, 2018.

MAZÓN, M.; AGUIRRE, N.; ECHEVERRÍA, C.; ARONSON, J. Monitoring attributes for ecological restoration in Latin America and the Caribbean region. **Restoration Ecology**, v. 27, n. 5, p. 992-999, 2020. DOI: 10.1111/rec.12986.

MITCHELL, R. L.; AULD, M. H. D.; LE DUC, M. G.; MARRS, R. H. Ecosystem stability and resilience: a review of their relevance for the conservation management of lowland heaths. **Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics**, v. 3, p. 142-160, 2000. DOI: 10.1078/1433-8319-00009.

RIBEIRO, R. C.; DANTAS, B. F.; MATIAS, J. R.; PELACANI, C. R. Efeito do estresse salino na germinação e crescimento inicial de plântulas de *Erythrina velutina* Willd. (Fabaceae). **Gaia Scientia**, v. 11, n. 4, p. 65-78, 2017. DOI: 10.22478/ufpb.1981-1268.2017v11n4.35471.

RINOT, O.; LEVY, G. J.; STEINBERGER, Y.; SVORAY, T.; ESHEL, G. Soil health assessment: A critical review of current methodologies and a proposed new approach. **Science of the Total Environment**, v. 648, p. 1484-1491, 2019. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.08.259.

ROCHA, J. H. T.; SANTOS, A. J. M.; DIOGO, F. A.; MELO, A. G. C.; BORELLI, K.; GODINHO, T. O. Reflorestamento e recuperação de atributos químicos e físicos do solo. **Floresta e Ambiente**, v. 22, n. 3, p. 299-306, 2015. DOI: 10.1590/2179-8087.041613.

RUSSO, E. E. R.; RAPOSO, A. B.; FERNANDO, T.; GATASS, M. A. Realidade virtual na indústria de exploração e produção de petróleo. In: KIRNER, C., TORI, R. (eds.). **Realidade Virtual: conceitos e tendências**. São Paulo: Editora Mania de Livro, 2004. p. 283-288.

SANTOS, P. L.; FERREIRA, R. A.; ARAGÃO, A. G.; AMARAL, L. A.; OLIVEIRA, A. S. Estabelecimento de espécies florestais nativas por meio de semeadura direta para recuperação de áreas degradadas. **Revista Árvore**, v. 36, n. 2, p. 237-245, 2012. DOI: 10.1590/S0100-67622012000200005.

SILVA, A. E. O.; MEDEIROS, E. V.; INÁCIO, E. S. B.; SALCEDO, I. H.; AMORIM, L. B. Soil enzymatic activities in areas with stages and management of forest regeneration from Caatinga. **Revista Caatinga**, v. 31, n. 2, p. 405-414, 2018. DOI: 10.1590/1983-21252018v31n217rc.

SILVA, A. P.; RESENDE, A. S.; CARPEGGIANNI, B. P.; MIRANDA, C. A. K.; AZEVEDO, C. R. C. Avaliação do desenvolvimento de espécies arbóreas em jazidas de extração de piçarra In: RESENDE, A. S. de; CHAER, G. M. (ed.). **Manual para recuperação de áreas degradadas por extração de piçarra na Caatinga**. Seropédica: Embrapa Agrobiologia, 2010. 78. p. 51-68

SILVA, M. O.; VELOSO, C. L.; DO NASCIMENTO, D. L.; OLIVEIRA, J. de; DE PEREIRA, D. de F.; COSTA, K. D. da S. Indicadores químicos e físicos de qualidade do solo. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 7, p. 47838-47855, 2020. DOI: 10.34117/bjdv6n7-431.

TÓTOLA, M. R.; CHAER, G. M. Microrganismos e processos microbiológicos como indicadores da qualidade do solo In: ALVAREZ, V.H.; SCHAEFER, C. E. G. R.; BARROS, N. F.; MELLO, J. W. V.; COSTA, L. M. (ed.) **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2002. p. 195-276.

CAPÍTULO 4

PERSPECTIVAS PARA A RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS DA CAATINGA

*Eduardo Francia Carneiro Campello | Guilherme Montandon Chaer
Alexander Silva de Resende*

Introdução

O conjunto de informações apresentado nos capítulos anteriores permite inferir que é possível, por meio de diferentes técnicas, recuperar áreas degradadas por atividades de produção de petróleo e gás na Caatinga, apesar do baixo nível de resiliência desses ambientes. Da mesma forma, metodologias de monitoramento tradicionais e inovadoras, como o uso de técnicas de sensoriamento remoto, provêm um arcabouço ferramental efetivo para monitorar o andamento do processo de recuperação e para a tomada de decisão sobre a necessidade de novas intervenções.

No entanto, várias questões subsequentes podem ser levantadas em um contexto mais amplo, de modo que as ações de recuperação se tornem efetivas e que o ambiente, uma vez recuperado, assim se perpetue. Este capítulo apresenta discussões sobre questões relacionadas a duas esferas distintas, mas interdependentes. A primeira é a político-legislativa, que diz respeito ao arcabouço de leis e políticas públicas existentes e sua efetividade para conservar e recuperar áreas degradadas da Caatinga. Nessa esfera, dois temas são abordados mais profundamente. O primeiro diz respeito à necessidade de critérios

transparentes e factíveis para determinar o cumprimento da obrigação de reposição florestal por pessoa física ou jurídica que tenha suprimido vegetação para atividades produtivas. Atualmente, poucos estados brasileiros dispõem de normativas bem definidas nesse sentido, o que não é o caso daqueles onde ocorrem atividades de exploração e produção de petróleo e gás em terra no bioma Caatinga, como Rio Grande do Norte e Ceará.

O segundo tema diz respeito às atuais políticas de promoção da conservação do bioma, a exemplo daquelas relacionadas ao pagamento por serviços ambientais, situação em que o dono da terra é incentivado economicamente a garantir a preservação do ambiente natural em parte determinada de sua propriedade. Apesar de tais políticas estarem avançando em outras regiões do país, o ritmo com que vêm ocorrendo nos estados do Nordeste inseridos na Caatinga é mais lento do que na Amazônia e na Mata Atlântica, por exemplo.

Na segunda esfera são abordados sistemas produtivos, a exemplo de plantios florestais para produção de energia (lenha e carvão) e sistemas silvipastoris, com potencial de serem implantados em áreas degradadas além do potencial paisagístico de muitas plantas do bioma. Com base nos resultados de pesquisas sobre seleção de espécies adaptadas para revegetar áreas degradadas por extração ou uso de piçarra, é possível elencar algumas com alto potencial para introdução de sistemas produtivos nessas áreas, severamente impactadas, e em outras áreas degradadas da Caatinga.

A legislação ambiental e a restauração de áreas degradadas

A legislação ambiental vem sendo determinante na história do uso e da ocupação do solo no País. Em 1934, foi implantado o primeiro código florestal brasileiro, com o objetivo de disciplinar o uso dos recursos naturais. Este código foi oriundo da percepção social da época de que os recursos naturais não eram

infinitos (Borges et al., 2009). A pressão demográfica e de uso no eixo Rio de Janeiro-São Paulo motivou sua publicação. Já em 1965, ganhava escala a mecanização agrícola e com ela a forte expansão agrícola. Em 1950, segundo dados do Censo Agropecuário (IBGE, 2017), o país tinha 8.372 tratores e cerca de 17,7 milhões de hectares plantados. Já em 1970 a quantidade de tratores pulou para 165.870 (aumento de 1.900%) e a área plantada praticamente dobrou (31 milhões de hectares). Essa velocidade e os apelos ambientais que se iniciavam mundo afora, principalmente na sociedade europeia, criaram a necessidade de ajuste na regulamentação das leis ambientais do País, agora com um foco mais preservacionista. Foi a partir do Código Florestal de 1965 que as florestas foram tratadas como bem de interesse comum e foi criado o Instituto Brasileiro de Desenvolvimento Florestal (IBDF) (Magalhães, 2002), ligado ao Ministério da Agricultura. Mais tarde, o instituto veio a ser convertido nos atuais Ibama (1989) e ICMBio (2007).

Porém, o avanço das questões ambientais foi maior a partir da promulgação da Constituição Federal de 1988 que, em seu artigo 225, traduz o anseio da sociedade apontando que “todos têm direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado, bem de uso comum do povo e essencial à sadia qualidade de vida, impondo-se ao poder público e à coletividade o dever de defendê-lo e preservá-lo para as presentes e futuras gerações.”

A garantia de um meio ambiente de qualidade para todos na Constituição Federal fez crescer o direito ambiental e com ele um arcabouço legal ligado a necessidade de licenciamento de empreendimentos, compensações ambientais, termos de ajustamento de conduta e multas ambientais, reforçando o conceito legal criado à época de “poluidor-pagador”. Este afirma que se a atividade for potencialmente poluidora, quem a executa deve compensar o dano ambiental causado à sociedade. Toda essa questão fez evoluir a legislação e a cobrança, por parte dos órgãos ambientais, de licenciamentos para viabilizar empreen-

dimentos, inicialmente de empresas de mineração e de outras que fazem uso direto de recursos naturais, mas atualmente permeando todas as cadeias produtivas, tanto em ambientes rurais como urbanos.

As leis ambientais brasileiras tiveram grande avanço desde 1965, mas é importante ressaltar como marco de internalização das questões ambientais na sociedade a realização da Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento em 1992. O evento ocorreu no Rio de Janeiro, com a presença de representantes de todo o mundo, e ficou conhecido como Eco-92. É importante dizer que foi só naquele ano que a questão ambiental ganhou *status* de ministério, com a criação do Ministério do Meio Ambiente.

O movimento mais recente desse arcabouço legal aconteceu em 2012, quando foi promulgada a Lei Federal 12.651 de Proteção a Vegetação Nativa (Brasil, 2012), que substituiu o código florestal então vigente desde 1965. Essa lei cria a figura do cadastro ambiental rural (CAR) e do programa de regularização ambiental (PRA), que buscam incentivar a adequação ambiental de propriedades rurais no país. Os dois mecanismos, se bem executados, podem funcionar como importantes ferramentas de planejamento da produção de água, serviços ambientais e produção agropecuária.

A lei delega aos estados a normatização do PRA e, com isso, cria oportunidades para cada ente adequar a recuperação ambiental de suas paisagens a partir de regra própria. Um exemplo é o Rio de Janeiro, que, a partir da Resolução 143 de 2017, do Instituto Estadual do Ambiente (Instituto Estadual do Ambiente, 2017), criou indicadores e valores de referência para que a restauração possa ser considerada bem-sucedida e o compromisso ambiental ser considerado quitado junto ao órgão ambiental.

Esse arcabouço legal, resumido na ferramenta “Restauradora” (Figura 1), elimina a subjetividade da decisão e orienta o empreendedor sobre os parâmetros que precisam ser atingidos para que o plantio possa ser considerado bem-sucedido.

Use a RESTAURADORA "A calculadora da Restauração Florestal"

AVALIAÇÃO DO PROJETO					
Certificação para quitação / Plantio Total (Ano 4) / Florestas					
Parâmetros indicadores	Crítico = 0	Mínimo = 0,65	Adequado = 1	Resultados do monitoramento	Nota
Densidade (n° ind./ha)	< 1111	≥ 1111 < 1250	≥ 1250	1200	0,65
Ind. Zoocóricos (%)	< 40	≥ 40 < 60	≥ 60	65	1
Cobertura de copa (%)	< 50	≥ 50 < 70	≥ 70	65	0,65
Equidade J'	< 0,6	≥ 0,6 < 0,8	≥ 0,8	0,9	1
Riqueza S'	< 10	≥ 10 < 20	≥ 20	22	1
Altura média (m)	< 2	≥ 2 < 3	≥ 3	3,2	1
Infestação de gramíneas (%)	≥ 30	> 20 < 30	< 20	25	0,65
Conceito final*	8.50				
*Conceito final > 8,0 = satisfatório; < 8,0 = insuficiente / IMPORTANTE: Só utilize vírgulas para separar casas decimais					

Importante: Os indicadores e parâmetros da restauradora são referentes e esperados para o ambiente de reflorestamento da fitofisionomia florestal (Floresta Ombrófila Densa - FOD, Floresta Estacional Semidecidual - FESD e Floresta Estacional Decidual - FED) para o quarto ano. Esta ferramenta está em fase de desenvolvimento e normatização pelo Inea.

Figura 1. Planilha de indicadores e seus valores de referência utilizados pela ferramenta “Restauradora” para avaliar projetos de restauração florestal no estado do Rio de Janeiro. No exemplo hipotético, o plantio realizado atingiu nota 8,5, suficiente para solicitar quitação do compromisso ambiental junto ao órgão ambiental. Disponível em: <https://www.restauracaoflorestalrj.org/restauracao-restauradora>. Acesso em: 10 de agosto de 2021.

Os órgãos ambientais estaduais, mais do que nunca, possuem papel decisivo na restauração ambiental de seu território. A legislação federal traçou as linhas gerais dos processos que envolvem a compensação ou a recuperação ambiental, mas delegou o detalhamento aos estados. São estes entes que definem o que deve ser licenciado, quais compensações devem ser feitas em cada empreendimento e como elas devem se dar. Os estados geram termos de ajustamento de conduta para corrigir impactos ambientais identificados ao longo do processo produtivo, multas e sua destinação, entre outros.

Dessa forma, e baseado na premissa da necessidade de transparência e da normatização do que se espera de ações de restauração florestal em cada caso,

fica nítido que os estados precisam, a exemplo do Rio de Janeiro, gerar proposições a respeito do tema. É importante, portanto, que os estados regulamentem os processos de recuperação de áreas degradadas de forma a torná-los mais previsíveis, transparentes e factíveis tanto para quem faz como para quem fiscaliza, adaptando-o à realidade ambiental de cada estado.

Políticas de proteção e conservação de áreas naturais na Caatinga

Em 2017, a Caatinga contava com 149 unidades de conservação (UC) estaduais e federais, incluindo as de proteção integral e de uso sustentável (CNUC, 2021). Essas UCs cobriam aproximadamente 6,5 milhões de hectares, o que equivale a 7,7% do bioma, mas somente 25% eram UCs de proteção integral, como Estação Ecológica, Reserva Biológica, Parques Nacional e Estadual, Monumento Natural e Refúgio de Vida Silvestre. Praticamente todo o restante, cerca de 5,8% do bioma (ou ~74% da área das UCs), referem-se a Áreas de Proteção Ambiental (APA), as quais são pouco efetivas em termos de conservação, estando frequentemente sujeitas a incêndios, caça e desmatamento, além de lhes faltar recursos para manutenção de pessoal técnico e haver problemas fundiários (Ganem et al., 2017).

As Reservas Particulares do Patrimônio Natural (RPPNs), que representam áreas privadas voluntariamente colocadas sob conservação, são praticamente inexpressivas na Caatinga, abrangendo apenas 0,7% da área das UCs e 0,05% do bioma. Isto demonstra a falta de interesse ou de estímulo para que os proprietários destinem parcela de suas terras à conservação, o que pode estar relacionado a dificuldades burocráticas e falta de apoio e incentivo governamental (Ganem et al., 2017).

Considerando os dados acima, infere-se que a maior parte do bioma Caatinga encontra-se em situação frágil no que se refere à promoção da conservação.

Uma das formas de reverter esse quadro está relacionada ao direcionamento de políticas que foquem a conservação e o aproveitamento sustentável da biodiversidade como meio de reduzir a pobreza. Neste sentido, programas de pagamento por serviços ambientais (PSA) podem ser o elo entre conservação e políticas públicas de combate à pobreza e geração de renda na região (Ganem et al., 2017). Além disso, por toda a condição econômica que o bioma possui, talvez seja o local do país que mais precise de fato de uma política ambiental com foco em renda.

O bioma Caatinga tem grande potencial para serviços ambientais de conservação e uso econômico sustentável, que, se bem aproveitado, pode ser decisivo para o desenvolvimento regional. Há uma grande diversidade de possibilidades, que faz com que o bioma tenha vocação para atividades econômicas com fins agrossilvipastoril e industrial, principalmente no ramo farmacêutico, de cosméticos, químico e alimentício. Portanto, são imperativas ações de conservação da Caatinga, tendo em vista ser o único bioma de distribuição exclusivamente brasileira com alto grau de endemismo e riqueza de espécies.

A promulgação da Lei 14.119, de 13 de janeiro de 2021, que institui a Política Nacional de Pagamento por Serviços Ambientais (Brasil, 2021), fortalece as perspectivas para os projetos de restauração florestal se enquadrarem e prestarem serviços ecossistêmicos para a sociedade.

Os serviços ambientais podem ser originados de forma individual ou coletiva e se caracterizam por manter, recuperar ou ampliar os serviços ecossistêmicos. Eles se dividem em quatro modalidades: provisão, suporte, regulação e culturais. Os serviços de provisão são aqueles que geram produtos como água, alimentos, madeira e outros. Os serviços de suporte apoiam e sustentam a vida no planeta e incluem entre eles a ciclagem de nutrientes, a dispersão de sementes, o controle de pragas e doenças e a biodiversidade. Os serviços de regulação, por sua vez, englobam a estabilidade dos processos ecossistêmicos por meio do sequestro de carbono, da purificação do ar, do controle de processos erosivos e

de deslizamento de encostas, entre outros. Por fim estão os serviços culturais, que produzem benefícios não materiais por meio da beleza cênica, turismo, recreação etc. (Brasil, 2021).

A lei caracteriza o PSA como uma transação de natureza voluntária, pela qual um pagador interessado nos serviços transfere a um provedor destes serviços recursos financeiros ou outra forma de remuneração, nas condições que forem previamente acertadas. Entre estes pagadores podem estar o poder público, organização da sociedade civil ou agente privado, pessoa física ou jurídica, de âmbito nacional ou internacional. O provedor, por sua vez, pode ser uma pessoa física ou jurídica, de direito público ou privado, grupo familiar ou comunitário.

Algumas questões importantes precisarão ser observadas em relação à política de PSA, como a escala dos projetos de restauração e a adequação ambiental das propriedades rurais à legislação ambiental vigente nos estados e a lei de proteção da vegetação nativa (Lei 12.651, Brasil, 2012) (Brancalion et al., 2015). No que diz respeito à escala, pode-se questionar como projetos pontuais ou de pequeno porte poderão ser elegíveis a receber PSA. Por exemplo, para mensurar o sequestro de carbono, ganhos na conservação de biodiversidade, benefícios para polinização de plantas ou a qualidade do ar, quanto maior for a escala, maior será a possibilidade de quantificar esses serviços e de receber compensações. Desse modo, para viabilizar o PSA em pequenas áreas seria necessário agrupar propriedades contíguas com áreas com cobertura vegetal nativa.

A produção de água tem sido o serviço ambiental pioneiro em programas de PSA em diversos municípios, como o Programa Produtor de Água da Agência Nacional de Águas (Programa Produtor de Água, 2021), que já contempla produtores rurais de 15 estados. Na Caatinga, apenas um projeto foi apoiado, nas proximidades da Usina de Xingó, em Sergipe, na divisa com Alagoas, em zona de influência do Rio São Francisco. A iniciativa envolve cerca de sessenta famílias de um assentamento rural (Ana, 2021).

No que tange a imobilização de carbono atmosférico no lenho das espécies florestais e no solo a partir de aportes na serapilheira, o momento de movimentações políticas no mundo, com a mudança de governo nos EUA, sinaliza favoravelmente para estipular compensações financeiras por este tipo de serviço de regulação. A questão das mudanças climáticas voltou a ser valorizada nas relações entre nações e os créditos de carbono ganham nova oportunidade para se firmarem como realidade, uma vez que tinham perdido fôlego com ausência de negócios da bolsa de Chicago.

Dessa forma, um planejamento para integrar os projetos de recuperação de jazidas, formando áreas maiores adicionando as reservas legais e as APPs das propriedades rurais, pode, de certa forma, ter mais relevância na prestação de serviços ambientais.

Outro ponto importante dos projetos de restauração é a necessidade de engajar mais os proprietários rurais sobre a importância da recuperação das áreas degradadas. Para isso, tanto programas de PSA como a implantação de plantas que propiciem algum retorno econômico podem ser a chave para ampliar a adesão dos proprietários. Os resultados do trabalho de Oliveira et al. (2021), apesar de obtidos no bioma Mata Atlântica, levantam questões importantes, que também se aplicam à Caatinga. Esses autores concluíram que aspectos econômicos e a conscientização dos proprietários da terra, incluindo a participação da comunidade local, estão entre os principais indicadores de sucesso nos primeiros anos dos projetos de recuperação de áreas degradadas.

Na vertente do retorno econômico, os sistemas agroflorestais, silvipastoris ou baseados no cultivo de espécies com potencial energético enquadram-se como opções promissoras para recuperar áreas degradadas da Caatinga (Micolis et al., 2016; Tavares et al., 2020). No entanto, em áreas severamente impactadas, como as tratadas neste livro, há restrições para a implementação de sistemas agroflorestais, que normalmente envolvem cultivos agrícolas que irão demandar solos de alta qualidade para sua viabilidade.

Por outro lado, os sistemas silvipastoris e o cultivo de espécies energéticas possuem grande potencial de aplicabilidade em áreas severamente impactadas, desde que espécies-chave, com alta adaptabilidade e características funcionais desejáveis, sejam implementadas.

Essas duas opções de uso do solo são detalhadas nos tópicos seguintes. Adicionalmente, embora não necessariamente atrelado ao contexto da recuperação de áreas degradadas, deve-se ressaltar o enorme potencial ornamental da biodiversidade da Caatinga com suas cactáceas, flores, plantas de cobertura e apicultura. Construímos um tópico de finalização deste livro que objetiva conversar com o leitor a partir de imagens, para ajudar a entender um pouco melhor o potencial desse bioma.

Produção de energia a partir de espécies da Caatinga

A pressão do desmatamento ilegal na Caatinga está relacionada, em grande extensão, ao uso da madeira em atividades associadas à indústria de cerâmica, a olarias, produção de cal, fornos de padarias e pizzarias, provimento de estacas para cercas rurais e ao consumo doméstico, para cocção de alimentos (Tavares et al., 2012). Entretanto, várias espécies florestais nativas do bioma possuem alta adaptabilidade e capacidade de produção de biomassa em áreas severamente degradadas (Gonçalves, 2020). Algumas destas espécies são fortes candidatas a serem inseridas em sistemas produtivos de lenha ou carvão em áreas degradadas. Esta alternativa, se adotada em grande extensão, é uma forma de minimizar a pressão de exploração de lenha sobre áreas com vegetação natural do bioma.

Os estudos feitos pela equipe e apresentados no capítulo 2 desta obra, indicam pelo menos três espécies de leguminosas arbóreas de rápido crescimento que apresentam potencial para plantios de florestas energéticas visando a pro-

dução de lenha: jurema-preta (*Mimosa tenuiflora* Willd.), jurema-branca (*Piptadenia retusa* P.G.Ribeiro, Seigler & Ebinger) e sabiá (*Mimosa caesalpiniiifolia* Benth.) (Lima et al., 2015; Gonçalves, 2020). Estas espécies apresentaram rápida produção de biomassa nas áreas degradadas por exploração ou uso de piçarra, figurando como boas opções para a produção de florestas energéticas nessas áreas.

Além da capacidade adaptativa e de produção de biomassa, essas espécies apresentam alto poder calorífico, sendo adequadas à produção de energia, seja pelo uso direto na cocção de alimentos, seja em atividades industriais (Oliveira et al., 2006; Carvalho et al., 2020; Lins et al., 2020). Oliveira et al. (2006) demonstraram que o poder calorífico da madeira de *M. tenuiflora* foi superior ao do *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden e de muitas outras espécies da própria Caatinga. Em outro estudo, Lins et al. (2020) mostraram que os galhos de *M. caesalpiniiifolia* podem eficientemente ser convertidos em carvão vegetal, fato que permite o uso sustentável dessa espécie, uma vez que a manutenção do fuste principal permite uma rápida rebrota da copa.

Apesar do potencial das espécies de leguminosas arbóreas citadas, estudos devem ser realizados para avaliar a produtividade e estimar a idade de rotação dos povoamentos de áreas degradadas ou que sofreram desflorestamento. Em estudo realizado por Carvalho et al. (2020) em área de vegetação de Caatinga nativa no município de João Câmara, RN foi estimado, a partir de curvas de crescimento das principais espécies determinadas em inventário, que para as condições da área, a idade de rotação ou de corte deveria ser de 17,3 anos.

Entretanto, o manejo de jurema-preta, jurema-branca e/ou sabiá em plantios homogêneos ou em consórcios simples pode permitir produtividades substancialmente mais elevadas do que aquelas geradas em áreas naturais contendo um número alto de espécies, dentre as quais várias com baixas taxas de crescimento. Logo, o ciclo de corte dessas espécies, quando cultivadas em povoamentos homogêneos, potencialmente será menor do que aqueles necessá-

rios no manejo sustentável de áreas nativas. Estudos para avaliar esses aspectos estão atualmente em curso em área de jazida de piçarra localizada no município de Pendências, RN como parte do projeto de cooperação técnica entre a Embrapa e a Petrobras (Figura 2).



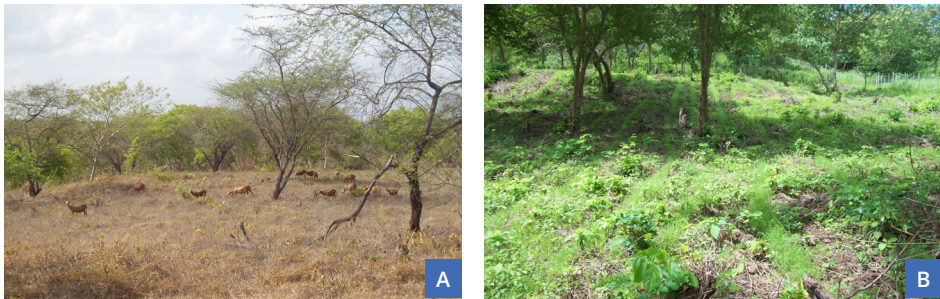
Fotos: Guilherme Montandon Chaer

Figura 2. Avaliação do desempenho de espécies nativas da Caatinga com potencial de fornecimento de madeira para lenha e carvão.

Complementarmente, é desejável a implantação de programas de seleção genética das espécies nativas da região com potencial energético, partindo da seleção de matrizes superiores, e de procedências e progênies que apresentem melhores resultados econômicos na região. Tais estudos envolvem planejamento e execução de longo prazo, pois podem ser necessários pelo menos dez anos para obter materiais genéticos minimamente selecionados para a produção de energia com espécies nativas na região. Mas tudo começa com a identificação de indivíduos superiores, com as características desejáveis para uma produção econômica. Processos de clonagem, tal qual feito para eucalipto, podem ser uma importante ferramenta para acelerar esse processo na Caatinga.

Sistemas silvipastoris

Sistemas silvipastoris, mais recentemente também denominados sistema de integração pecuária-floresta (ILP), combinam a criação animal com o cultivo de árvores de interesse, a partir da manutenção ou raleamento de espécies arbóreas naturalmente presentes na área (Figura 3). Tais sistemas apresentam grande potencial de expansão na Caatinga, visto que a maioria dos proprietários possui algum tipo de rebanho animal (Araujo et al., 2010).



Fotos: Francisco Eden Paiva Fernandes

Figura 3. Caatinga raleada e enriquecida com gramínea para fins silvipastoris durante o período seco (A) e chuvoso (B).

Os sistemas silvipastoris apresentam diversas vantagens em relação aos de criação animal tradicionais (sem o componente arbóreo). Por exemplo, o sombreamento proporcionado pelas árvores resulta em maior conforto térmico para os animais e, conseqüentemente, em menor consumo e melhor desempenho das criações (Santos et al., 2005). As árvores também têm impacto positivo sobre os estoques de carbono e nitrogênio no solo, o que melhora a produção e a qualidade das espécies herbáceas forrageiras associadas (Sacramento et al., 2013). Além disto, durante o período de estiagem, com a queda das folhas das árvores forma-se uma camada de serapilheira que protege o solo e pode ser consumida pelos animais, à medida que a produção de forragem herbácea se torna limitada.

Sistemas silvipastoris podem perfeitamente ser introduzidos em áreas degradadas, a exemplo de áreas de jazidas de piçarra desativadas ou outras degradadas pela exploração de petróleo ou gás na Caatinga, desde que espécies adequadas sejam utilizadas. Entre as espécies mais estudadas com potencial de uso em sistemas silvipastoris na Caatinga está o sabiá (*M. caesalpiniiifolia*), pois possui alta capacidade de adaptação e crescimento em áreas degradadas e pode ser manejado tanto para a produção de forragem como para a de lenha e madeira (Lima, 1984; Carvalho et al., 2004).

O sabiá é uma árvore nativa do Nordeste brasileiro, podendo ser introduzida em sistemas silvipastoris na Caatinga sem qualquer restrição de ordem ecológica. Sua folhagem possui até 17% de proteína bruta e palatável, podendo constituir até 70% do volumoso ingerido pelos animais durante a época de vegetação plena. As folhas também podem ser consumidas após o desprendimento da planta na época seca (Maia, 2004). Sua biomassa pode ainda ser usada para produzir feno após desidratação, que pode ser armazenado por longos períodos sem perda de qualidade nutritiva (Andrigueto et al., 1986).

Um fato que pode dificultar o manejo do sabiá para fins forrageiros é a presença de acúleos nos ramos e caules jovens. Entretanto, há exemplares desprovidos de acúleos em populações naturais (caráter recessivo) que podem ser reproduzidos vegetativamente ou cruzados com indivíduos comuns da população resultando em mais de 90% de descendentes sem acúleos (Drumond et al., 1999). Além da vantagem operacional do cultivo de variedades de sabiá sem acúleos em sistemas silvipastoris, a madeira da espécie é de melhor qualidade para construções rurais, por ser mais resistente ao ataque de cupins (Alencar, 2006).

Estudo conduzido por Alencar (2006) mostrou que uma população de 187 plantas/ha de sabiá não interferiu na quantidade de forragem produzida pela vegetação herbácea e ainda gerou 2 t/ha de matéria seca de forragem proveniente de podas de ramos com menos de 10 mm de diâmetro. O estudo também

mostrou que a poda dessa espécie deve ser feita no final do período das chuvas (junho), pois podas precoces (março) resultaram em menor produção de forragem pela leguminosa no ano subsequente.

O potencial forrageiro de espécies arbóreas da Caatinga parece ser muito superior ao descrito na literatura. Em levantamento florístico realizado em assentamentos agrícolas em Canindé do São Francisco (SE), de 16 espécies arbóreas relatadas pelos assentados como forrageiras apenas nove eram citadas na literatura (São Mateus et al., 2012). Isso demonstra que ainda há muito a se conhecer e pesquisar sobre o potencial de espécies arbóreas da Caatinga para uso em sistemas agrossilvipastoris em áreas degradadas.

Biodiversidade da Caatinga

Em geral, muito se fala no potencial econômico da Caatinga, da necessidade da criação de estratégias de plantios florestais na região para reduzir a pressão sobre a vegetação nativa e no manejo mais adequado dos diferentes usos de forma a torná-los mais conservacionistas e compatíveis com a fragilidade ambiental. No entanto, poucos materiais abordam o potencial não madeireiro, ou de uso da biodiversidade. Nesse tópico não serão utilizados argumentos textuais para demonstrar esse potencial, mas faremos um apanhado de oportunidades ilustradas por fotografias disponíveis no banco de imagens da Embrapa.



Fotos: Marcelino Ribeiro e Guilherme Montandon Choer



Foto: Guilherme Montandon Choer

Figura 4. Cactáceas. Indispensável em qualquer coleção de cactáceas, a coroa de frade tem elevado valor ornamental. Várias outras espécies de cactos nativos possuem igual potencial, mas ainda pouco explorado.



Fotos: Guilherme Montandon Chaer

Figura 5. Bromeliáceas. A *Bromelia lacinosa* ou macambira é abundante na região e, além do seu potencial ornamental, pode ser utilizada como alimento para o gado.



Fotos: Guilherme Montandon Chaer

Figura 6. Tapete verde. Plantas de forração que ocorrem de forma espontânea em jazidas de piçarra e apresentam grande potencial ornamental.



Figura 7. Flores no *topsoil*. Inflorescências de múltiplas espécies herbáceas que regeneram a partir de *topsoil* trazido para recompor as áreas de piçarra. O florescimento ocorre menos de dois meses após o início das chuvas.



Foto: Marcelino Ribeiro

Figura 8. Ninho de pombinha no mandacaru. A adaptação da flora e da fauna da Caatinga é algo memorável e muito bem retratada na foto.



Foto: Kátia Sampaio Malagodi-Braga

Figura 9. Abelha jataí da terra polinizando morangueiro. Embora esta imagem não seja na Caatinga, a jataí se adapta muito bem ao bioma, polinizando e produzindo um mel de alto valor no mercado.



Figura 10. Geleia de frutas – A Embrapa vem atuando não só no cultivo, mas também no beneficiamento e industrialização dos produtos da Caatinga.

Considerações finais

Nestes quase 15 anos de pesquisas em recuperação ambiental em áreas de produção de petróleo e gás em terra na região semiárida do Rio Grande do Norte, em parceria com a Petrobras, houve avanços em protocolos de recuperação, dezenas de hectares recuperados e muito aprendizado e troca de saberes com os parceiros locais. A Caatinga certamente é o bioma mais dinâmico do País. Nela, a vida explode a partir das primeiras chuvas e arrefece ao fim do período úmido. A Caatinga é um bioma que todo brasileiro deveria ter a sorte de conhecer, por sua plenitude, sua rochiosidade, as cores vibrantes dos pássaros, a beleza das cactáceas e o potencial ornamental de suas plantas.

Por outro lado, é um bioma pouco conhecido na região Centro-Sul do País, o menos protegido e, portanto, o mais ameaçado. Criar alternativas econômicas de uso, desenvolver a cadeia madeireira e não madeireira, ajustar a legislação para que seja possível fazer a restauração ecológica de forma direcionada e atendendo as especificidades do bioma são medidas fundamentais. A pesquisa científica tem muito a contribuir nesse processo, mas se faz necessário apoio de estudos de médio a longo prazo, com financiamento contínuo e com metas bem definidas e escalonadas. Para isso, a parceria entre empresas, governo, academia e proprietários rurais será cada vez mais necessária.

Referências

- ALENCAR, F. H. H. **Potencial forrageiro da espécie sabiá (*Mimosa caesalpinifolia* Benth.) e sua resistência a cupins subterrâneos**. Dissertação. 2006. p. Dissertação (Mestrado em Zootecnia)). Universidade Federal de Campina Grande, Patos, PB.
- ANDRADE, L. A.; FABRICANTE, J. R.; OLIVEIRA, F. X. Impactos da invasão de *Prosopis juliflora* (sw.) DC. (Fabaceae) sobre o estrato arbustivo-arbóreo em áreas de Caatinga no Estado da Paraíba, Brasil. *Acta Scientiarum. Biological Sciences*, v. 32, n. 3, p. 249-255, 2010. DOI: 10.4025/actascibiolsci.v32i3.4535.
- ANDRIGUETTO, J. M.; PERLY, L.; MINARDI, I.; FLEMMING, J. S.; GEMAEL, A.; SOUZA, G. A.; BONA FILHO, A. **Nutrição Animal**. 3ª ed. São Paulo: Nobel, 1986. v. 1, 369 p.
- ARAUJO, K. D.; DANTAS, R. T; ANDRADE, A. P.; PARENTE, H. N.; ÉDER-SILVA, E. Uso de espécies da Caatinga na alimentação de rebanhos no município de São João do Cariri, PB. *Raega*, v. 20, p. 157-171, 2010. DOI: 10.5380/raega.v20i0.20619
- BORGES, L. A. C.; REZENDE, J. L. P.; PEREIRA, J. A. A. Evolução da legislação ambiental no Brasil. *Revista em Agronegócios e Meio Ambiente*, v. 2, n. 3, p. 447-466, 2009. DOI: 10.17765/2176-9168.2009v2n3p447-466.
- BRANCALION, P. H. S.; GANDOLFI, S.; RODRIGUES, R. R. **Restauração Florestal**. São Paulo: Oficina de Textos, 2015, 431 p.
- BRASIL. Presidência da República. Lei Nº 12.651, de 25 de maio de 2012. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa; altera as Leis nºs 6.938, de 31 de agosto de 1981, 9.393, de 19 de dezembro de 1996, e 11.428, de 22 de dezembro de 2006; revoga as Leis nºs 4.771, de 15 de setembro de 1965, e 7.754, de 14 de abril de 1989, e a Medida Provisória nº 2.166-67, de 24 de agosto de 2001; e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, 28 de maio de 2012.
- BRASIL, **Lei Federal 14.119, de 13 de janeiro de 2021**, institui a política nacional de pagamento por serviços ambientais e altera as Leis 8.212, de 24 de julho de 1991, 8.629, de 25 de fevereiro de 1993, e 6.015, de 31 de dezembro de 1973, para adequá-las à nova política. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2021/lei/L14119.htm. Acesso em: 10 ago. 2021.

CARVALHO, A. C.; SANTOS, R. C.; CASTRO, R. V. O.; SANTOS, C. P. S.; COSTA, S. E. L.; CARVALHO, A. J. E.; PAREYN, F. G. C; VIDAURRE, G. B.; DIAS JUNIOR, A. F.; ALMEIDA, M. N. F. Produção de energia da madeira de espécies da Caatinga aliada ao manejo florestal sustentável. **Scientia Forestalis**, v. 48, n. 126, 2020. DOI: 10.18671/scifor.v48n126.08.

CARVALHO, F. C. de; GARCIA, R.; ARAUJO FILHO, J. A. de; COUTO, L.; NEVES, J. C. L.; ROGÉRIO, M. C. P. Manejo in situ do Sabiá (*Mimosa caesalpinifolia* Benth.) para produção simultânea de madeira e forragem em um sistema silvipastoril. **Agrorivicultura**, v. 1, n. 2, p. 121-129, 2004. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/531975/manejo-in-situ-do-sabia-mimosa-caesalpinifolia-benth-para-producao-simultanea-de-madeira-e-forragem-em-um-sistema-silvipastoril>. Acesso em: 11 ago. 2021.

CNUC. Cadastro Nacional de Unidades de Conservação. Consulta realizada em 02/06/2021. Disponível em: <https://antigo.mma.gov.br/areas-protetidas/cadastro-nacional-de-ucs.html>. Acesso em: 10 ago. 2021.

DRUMOND, M. A.; OLIVEIRA, V. R.; LIMA, M. F. *Mimosa caesalpinifolia*: estudos de melhoramento genético realizado pela Embrapa Semiárido. In: QUEIROZ, M. A. de; GOEDERT, C. O.; RAMOS, S. R. R. (ed.). **Recursos genéticos e melhoramento de plantas para o Nordeste brasileiro**. Petrolina: Embrapa Semi-Arido; Brasília, DF: Embrapa Recursos Genéticos e Biotecnologia, 1999.

GANEM, R. S. **Caatinga: estratégia de conservação**: estudo técnico. Brasília: Câmara dos Deputados, 2017. Disponível em: https://bd.camara.leg.br/bd/handle/bdcamara/34479?_ga=2.180824103.1624152362.1628603686-308750751.1628603686. Acesso em: 10 ago. 2021.

GONÇALVES, F. L. A. **Estratégias de recuperação de áreas degradadas pela exploração e produção de petróleo na Caatinga**. 2020. Tese (Doutorado em Ciências Ambientais) - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica.

IBGE. **Censo Agropecuário**. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/censo-agropecuario/series-temporais>. Acesso em: 10 ago. 2021.

INSTITUTO ESTADUAL DO AMBIENTE (RJ). Resolução INEA nº 143, de 14 de junho de 2017. Institui o sistema estadual de monitoramento e avaliação da restauração florestal (SEMAR) e estabelece as orientações, diretrizes e critérios sobre elaboração, execução e monitoramento de projetos de restauração florestal no estado do Rio de Janeiro. **Diário Oficial do Estado do Rio de Janeiro**, n. 127, p. 17-23, 12 jul. 2017. Disponível em: <http://www.inea.rj.gov.br/wp-content/uploads/2019/01/RESOLU%C3%87%C3%83O-INEA-N%C2%BA-143.pdf>. Acesso em: 18 out. 2021.

LIMA, K. D. R.; CHAER, G. M.; ROWS, J. R. C.; RESENDE, A. S. Seleção de espécies arbóreas para revegetação de áreas degradadas por mineração de piçarra na Caatinga. **Revista Caatinga**, v. 28, n. 1, p. 203-213, 2015. Disponível em: <https://periodicos.ufersa.edu.br/index.php/caatinga/article/view/3644>. Acesso em: 10 ago. 2021.

LIMA, P. C. F. Algaroba: Uma das alternativas para o Nordeste. **Brasil Florestal**, v. 58, p. 47-84, 1984.

LINS, T. R. S.; BRAZ, R. L.; SOUZA JUNIOR, C. G. C.; CORREIA, H. T. V.; SILVA, T. C.; WALTER, L. S. Rendimento e caracterização do carvão vegetal de galhos de *Mimosa caesalpinifolia* Benth. **Biofix Scientific Journal**, v. 5, p. 39-43, 2020. DOI: 10.5380/biofix.v5i1.67394.

MAGALHÃES, J. P. **A evolução do direito ambiental no Brasil**. São Paulo: J. Oliveira, 2002. 76 p.

MAIA, G. N. **Caatinga: árvores e arbustos e suas utilidades**. São Paulo: D&Z Computação Gráfica e Editora, 2004. 413 p.

MICCOLIS, A.; PENEIREIRO, F. M.; MARQUES, H. R.; VIEIRA, D. L. M.; ARCO-VERDE, M. F.; HOFFMANN, M. R.; REHDER, T.; PEREIRA, A. V. B. **Restauração ecológica com sistemas agroflorestais: como conciliar conservação com produção: opções para Cerrado e Caatinga**. Brasília: ISPN; ICRAF, 2016.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Secretaria de Biodiversidade e Florestas. **Avaliação e identificação de áreas e ações prioritárias para a conservação, utilização sustentável e repartição dos benefícios da biodiversidade nos biomas brasileiros**. Brasília, 2002. 404 p.

NASCIMENTO, C. E. S. **Comportamento invasor da algarobeira *Prosopis juliflora* (Sw) DC. nas planícies aluviais da Caatinga.** 2008. 115 f. Tese (Doutorado em Biologia Vegetal) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife.

OLIVEIRA, E.; VITAL, B. R.; PIMENTA, A. S.; LUCIA, R. M. D.; LADEIRA, A. M. M.; CARNEIRO, A. C. O. Estrutura anatômica da madeira e qualidade do carvão de *Mimosa tenuiflora* (Willd.) Poir. **Revista Árvore**, v. 30, n. 2, 2006. DOI: 10.1590/S0100-67622006000200018.

OLIVEIRA, R. E.; ENGEL, V. L.; LOIOLA, P. P.; MORAES, L. F. D.; VISMARA, E.S. Top 10 indicators for evaluating restoration trajectories in the Brazilian Atlantic Forest. **Ecological Indicators**, v. 127, 107652, 2021. DOI: 10.1016/j.ecolind.2021.107652.

PEGADO, C. M. A.; ANDRADE, L. A.; FÉLIX, L. P.; PEREIRA, I. M. Efeitos da invasão biológica de algaroba: *Prosopis juliflora* (Sw.) DC. sobre a composição e a estrutura do estrato arbustivo-arbóreo da caatinga no Município de Monteiro, PB, Brasil. **Acta Botanica Brasilica**, v. 20, n. 4, 2006. DOI: 10.1590/S0102-33062006000400013.

PEREIRA, J. C. D.; LIMA, P. C. F. Comparação da qualidade da madeira de seis espécies de algarobeira para a produção de energia. **Boletim de Pesquisa Florestal**, Colombo, n. 45, p. 99-106, jul./dez. 2002. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/306405/comparacao-da-qualidade-da-madeira-de-seis-especies-de-algarobeira-para-a-producao-de-energia>. Acesso em: 11 ago. 2021.

PROGRAMA PRODUTOR DE ÁGUA: **PROJETOS**. Brasília: Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/ana/pt-br/aceso-a-informacao/acoes-e-programas/programa-produtor-de-agua/projetos-1>. Acesso em: 10 jun. 2021.

SACRAMENTO, J. A. A. S.; ARAÚJO, A. C. M.; ESCOBAR, M. E. O.; XAVIER, F. A. S.; CAVALCANTE, A. C. R.; OLIVEIRA, T. S. Soil carbon and nitrogen stocks in traditional agricultural and agroforestry systems in the semiarid region of Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, p. 784-795, 2013. DOI: 10.1590/S0100-06832013000300025.

SANTOS F. C. B.; SOUZA B. B.; ALFARO C. E. P.; CEZAR, M. F.; PIMENTA FILHO, E. C.; ACOSTA, A. A. A.; SANTOS, J. R. S. Adaptabilidade de caprinos exóticos e naturalizados ao clima semi-árido do Nordeste brasileiro. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 29, p. 142-149, 2005. DOI: 10.1590/S1413-70542005000100018.

SÃO MATEUS, F. A. P.; FANTINI, A. C.; MELLO, A. A. de. Arbóreas forrageiras: pastagem o ano todo na caatinga sergipana. *Agroecologia e Desenvolvimento Rural Sustentável*, Porto Alegre, v. 5, n. 1, p. 39-45, jan./abr. 2012. DOI: 10.1590/S0100-67622012000100014.

TAVARES, B. G.; GUIMARÃES, G. P.; ANTUNES, V. Z. **Tecnologias agrícolas de baixa emissão de carbono no Brasil e no bioma Caatinga**: relatório Técnico. Rio de Janeiro: Fundação Brasileira para o Desenvolvimento Sustentável, 2020. Projeto Rural Sustentável Caatinga (PRS Caatinga).

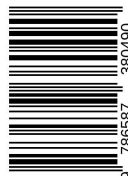
Embrapa

Agrobiologia

MINISTÉRIO DA
AGRICULTURA, PECUÁRIA
E ABASTECIMENTO



PÁTRIA AMADA
BRASIL
GOVERNO FEDERAL



CGPE 017049