

3 Estudo Geológico da Faja del Orinoco

3.1. Projeto Orinoco

O Projeto Orinoco procura explorar as reservas de óleos pesados da Faja del Orinoco para ampliar a participação da Venezuela no mercado internacional e impulsionar o desenvolvimento do país. A Faja del Orinoco tem sido dividida em quatro campos que compreendem 27 blocos, para quantificação de volumes, em um total de 18220 km². Tem-se uma estimativa de 186 bilhões de barris para serem certificados com 130 bilhões de reservas atuais. Existem 1360 bilhões de barris de óleo *in-situ* nos campos de Boyacá, Junin, Ayacucho e Carabobo, e reservas provadas de 37 bilhões de barris, Figura 3.1.

A Faja del Orinoco compreende 55.314 km², sendo a área de exploração atual de 11.593 km² (compreende os estados Guárico, Anzoategui e Monagas).



Figura 3.1. Óleo original *in-situ* e reservas provadas na Faja del Orinoco.

(www.pdvsa.com)

Alcançar a meta de obter um fator de recuperação da ordem de 20% com óleos pesados é um grande desafio, uma vez que os fatores de recuperação convencionais (sem técnicas de recuperação térmica ou injeção de fluidos) em

óleos pesados na região não alcançam 10% utilizando apenas a recuperação primária. Estudos têm sido iniciados e técnicas de recuperação secundária e terciária têm sido propostas, como SAGD (Steam Assisted Gravity Drainage), Combustão *in-situ*, VAPEX (Vapor Assisted Petroleum Extraction), HASD (Horizontal Alternate Steam Drain), HCS (Horizontal Cycling Steam), aquecedores de fundo de poço, injeção de CO₂, injeção de água e injeção de polímeros. Um dos métodos considerados mais eficientes para a área estudada foi o SAGD. Para implementar esta técnica a empresa operadora tem buscado modelar possíveis impactos negativos do campo de esforços gerados pela frente de vapor nos poços horizontais injetores e produtores, assim como nos equipamentos de superfície e plantas produtoras de vapor em superfície.

Os óleos pesados e extra-pesados, assim como o betume, são de grande importância econômica para países como Venezuela e Canadá. A quantidade de petróleo *in-situ* na forma deste tipo de acumulação é maior do que a acumulação de óleos leves no Oriente Médio. É um grande desafio técnico para estes países produzir e utilizar eficiente e economicamente estes grandes recursos, uma vez que formam grande impacto no PIB destes países.

A drenagem gravitacional assistida por vapor (SAGD, pelas suas iniciais em inglês) é uma das tecnologias selecionadas para incrementar economicamente o fator de recuperação das grandes acumulações de óleos pesados da Faja del Orinoco. O projeto de injeção de vapor ainda não foi implementado no campo estudado.

3.1.1. Caracterização geológica da Faja del Orinoco

A Faja del Orinoco é um território que ocupa a margem sul da parte leste da Bacia do Rio Orinoco na Venezuela. A Faja del Orinoco está localizada ao sul dos estados de Guárico, Anzoátegui, Monagas e Delta Amacuro, e segue a linha do rio homônimo. Tem aproximadamente 600 km do leste para o oeste, e 70km do norte ao sul, com uma área aproximada de 55.314km², conforme ilustra a Figura 3.2:



Figura 3.2. Localização geográfica da Faja del Orinoco. (www.slb.com)

Segundo Fiorillo (1983) a Faja Petrolífera del Orinoco é a fronteira sul da Bacia Leste Venezuelana. As rochas do subsolo datam do pré-cambriano até a época atual e foram afetadas por vários períodos tectônicos, os quais deram origem aos eventos regionais, a combinação dos quais favoreceu grandes acumulações de óleo. Regionalmente, os intervalos mais importantes são da época do terciário. Em algumas localidades de interesse estendem até o cretáceo, onde também se encontram importantes acumulações. Devido à sua importância como rocha reservatório, foi feita uma síntese geológica qualitativa dos sedimentos do terciário, os quais afloram no sul.

3.1.1.1. Estratigrafia e Sedimentologia

Embasamento

A seqüência sedimentar foi depositada num embasamento ígneo-metamórfico que pertence ao Escudo Guayana, o qual está representado pela diversidade de tipos geológicos envolvendo uma alta porcentagem de rochas com composição granítica.

Paleozóico

O paleozóico é iniciado pelo desenvolvimento das Formações de arenito Hato-Viejo e a de argilito Carrizal. A última contém fósseis da era do baixo Cambriano. Para o nordeste da Faja de Óleo Pesado do Orinoco (Zuata e Machete) encontra-se um *graben* profundo chamado de “Espino”, o qual inclui rochas carboníferas não identificadas em outras partes da bacia.

Mesozóico

Depois de um extensivo período de erosão, a sedimentação do Mesozóico começou com uma seqüência de camadas vermelhas no Jurássico. Estas estão associadas com eventos tectônicos de grande magnitude que ocasionou fluxo basáltico e falhamento intenso na parte noroeste da Faja conhecida atualmente como zona de falha Altamira. Subseqüentemente, durante o Cretáceo, os clastos do Grupo Temblador foram depositados conformando as Formações Canoa e Tigre. Os ambientes deposicionais destas formações são continentais e marítimo-fluvial, respectivamente.

Cenozóico

Depois da orogenia Cretáceo-eoceno e do levantamento epigenético da Faja de Óleos Pesados e do escudo, a área foi erodida a um *peneplai*. Ao fim do Eoceno, um novo ciclo de erosão começou com a transgressão do mar e a deposição da Formação Roblecito (equivalente ao Grupo Merecure), que persiste, com uma menor interrupção, através da deposição da Formação Oficina/Chaguaramas.

A coluna sedimentar terciária na Faja foi depositada durante três ciclos sedimentares de transgressão-regressão.

No ciclo 1 (Oligoceno) os sedimentos estão presentes só na parte oeste da Faja (áreas de Machete e Zuata leste) e inclui três unidades litoestratigráficas: arenitos basais da Formação Roblecito (máximo ponto de transgressão) e os arenitos regressivos da Formação Chaguaramas. A última nomenclatura da formação é restrita nesta síntese ao intervalo arenoso presente só na área de Machete.

Os ciclos 2 e 3 do Mioceno têm sido subdivididos em cinco unidades litoestratigráficas, as quais foram regionalmente estendidas, com o objetivo de simplificação da terminologia usada em cada área. O ciclo 2 compreende a Formação Oficina e o ciclo 3 compreende a seção superior desta formação e a Formação Freitas. A nomenclatura equivalente por áreas é apresentada pela Figura 3.3.

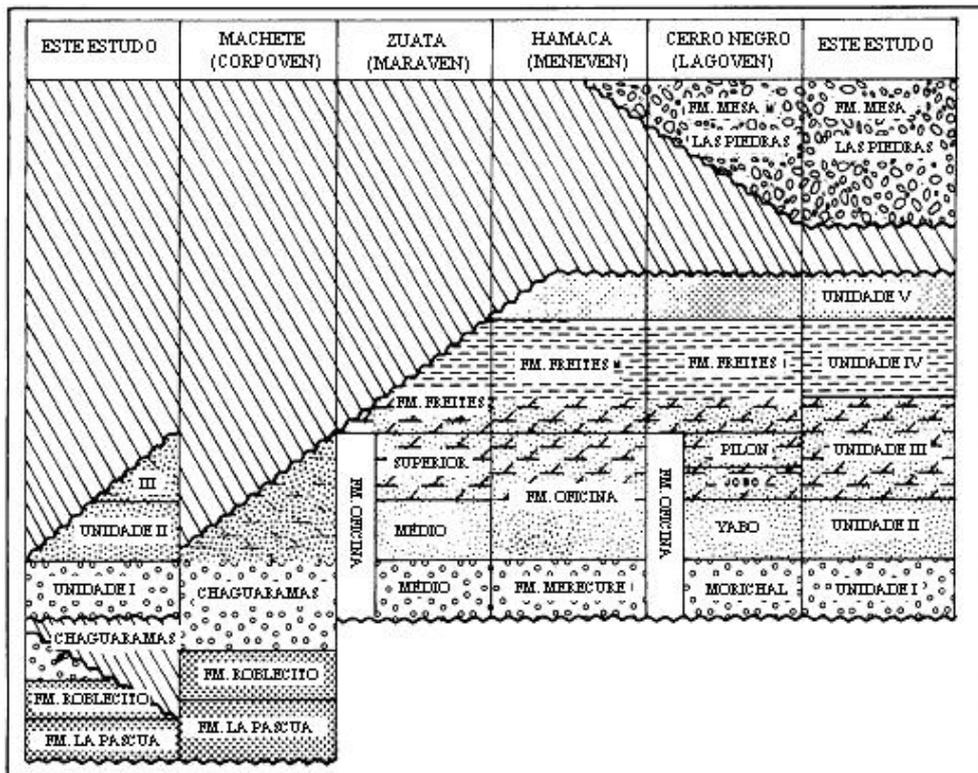


Figura 3.3. Carta de correlação estratigráfica das formações do Terciário na Faja del Orinoco (Fiorillo, 1983)

A unidade basal de cada ciclo, o mais importante já que possui a maior parte das acumulações de hidrocarbonetos, é predominantemente arenosa e foi depositada numa desconformidade acima dos sedimentos do pré-terciário e acima do embasamento. É conhecida por diferentes nomes ao longo da Faja, conforme ilustra a Figura 3.3. Seu topo é identificado em registros ao longo de toda a área. Sedimentologicamente, é subdividido em duas unidades. A parte basal, que contém uma espessa coluna de sedimentos, é bastante variável, entre 0 a 244m (0-800 ft), especialmente em Zuata e Machete. Esta subunidade constitui o *fill* da paleontografia. A direção geral da sedimentação é norte-sul e corresponde a vários deltas alimentados por rios que fluem desde o sul. Estes deltas foram *progradando* (*prograding*) desde a mesma direção, concomitante com o avanço da transgressão sobre o Escudo de Guyana.

A parte superior da unidade basal é formada por arenitos transgressivos de espessura mais uniforme (entre 0 e 91m [0 e 300ft]), orientado leste-oeste. Quando ambas as subunidades estão presentes e sobreexpostas, a direção desta parte alta converte-se indistinguível devido à desproporção das espessuras. A Figura 3.4 é um mapa de paleofácies da Unidade I, a qual apresenta uma área sem sedimentação ao sul atravessado só rios fluindo para o

norte, e depois coberto por grupos transgressivos tipo praia, bar e arenitos. No norte existem áreas extensivas onde a lama representa mais do que 50% da seqüência; estes parecem ser um depósito delta-plano atravessado por áreas estreitas de arenitos cuja distribuição horizontal amplia-se para o norte formando uma extensiva zona de arenitos. O mais importante depo-centro está localizado nesta zona.

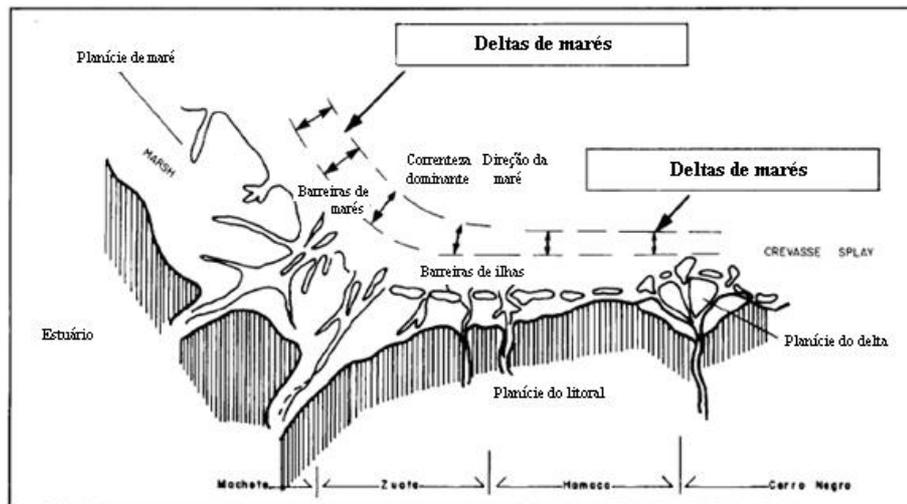


Figura 3.4. Desenho dos elementos paleoestratigráficos que controlaram a sedimentação das Unidades I, II e III da seqüência Oligoceno-Mioceno. (Fiorillo, 1983).

Mais longe, as areias estreitas indicam o curso tomado pelos canais distributários através do delta-plano. O setor norte, com a ampliação da zona arenosa e do depo-centro, corresponde à frente deltaica.

As areias transgressivas que cobrem a parte baixa da unidade e a distribuição das areias dos depo-centros indicam um sistema delta influenciado por ondas marinhas e mares. O sucessivo incremento das áreas de lama no delta-plano da Hamaca através de Zuata até Machete é interpretado como um resultado da diminuição da influência marinha para o oeste. A configuração da bacia do baixo ao médio Mioceno é de um golfo, parcialmente fechado ao leste, conforme ilustra a Figura 3.5. A presença de um sistema deltaico é crítica para um projeto SAGD, pois a presença de canais faz com que a locação e o desenho de um projeto deste porte sejam mais rigorosos. Deve ser feito um estudo geológico e geofísico para a locação e desenho dos poços.



Figura 3.5. Mapa paleográfico da distribuição deltaica da Unidade Oligoceno-Mioceno. Ao sul existe uma área positiva atravessada por rios fluindo de norte ao sul. (Fiorillo, 1983)

3.1.1.2. Estrutura e Tectonismo

As principais características do tectonismo da Faja são definidas pelo uso de mapas e seções estruturais, fazendo possível a identificação de duas províncias estruturais, separadas pelo sistema de falhas de Hato Viejo.

A Província Leste caracteriza-se pela transgressão terciária sobre o embasamento ígneo-metamórfico, com a exceção da fatia estreita localizada ao norte das áreas do Cerro Negro e Hamaca, onde o Terciário sobrejaze em sedimentos do Cretáceo. Na Província Oeste, para o oeste da falha Hato Viejo, na grande seção das áreas Machete e Zuata, o Terciário subjaze de forma discordante com as seqüências espessas dos sedimentos Cretáceos e Paleozóicos, os quais foram depositados em uma depressão estrutural profunda.

Regionalmente, a Faja é o resultado de falhas tectônicas, caracterizada por blocos rígidos, sem evidência de dobramentos definidos.

O deslocamento vertical das falhas não excede os 61m (200ft). As falhas são consistentemente do tipo normal-tensional, sem considerar se são transversais ou normais à tendência principal. Na Província Leste existem três tendências tectônicas preferenciais: (1) Leste-Oeste, localizada ao longo da zona de união ao norte da Hamaca e Cerro Negro; (2) N60° - 70° E, com tendência

paralela à direção predominante das rochas mais antigas na Guyana, ao sul do Rio Orinoco; e (3) N30° - 45° W, uma orientação muito promitente na base, refletindo a topografia transversa pré-terciária à direção regional da Faja, com depressões que foram preenchidas com depósitos fluvio-deltáicos no início da sedimentação terciária.

Na Província Oeste a direção predominante das falhas maiores varia do leste-oeste para nordeste-sudoeste.

Algumas falhas do último tipo são encontradas só na área de Machete. Nesta localização, o sistema de falhas Altamira forma um limite estrutural entre duas áreas: (1) ao sul, onde o embasamento é encontrado a uma profundidade rasa, o Cretáceo não é reconhecido, e o Paleozóico está localmente presente; e (2) a região norte, onde o embasamento é muito profundo e coberto de seqüências grossas de sedimentos do Cretáceo e Paleozóico.

Estruturalmente, o alto Machete é interpretado como atravessando a área na direção nordeste-sudoeste. Esta característica, confirmada pelo arenito basal da Formação Terciária Chaguaramas, é associada com o arco Monastério. O alto separa dois principais depo-centros e é admitido ser o limite oeste da Faja.

Segundo a *Well Evaluation Conference*, 1997, a formação Oficina pertence à Bacia Este Venezuelana, conforme ilustra a Figura 3.6, a qual é segunda em importância. Está limitada pela La Costa Mountain Range ao norte, pelo Rio Orinoco ao sul, pela plataforma Delta Orinoco ao este e pelo Lineamento El Baul ao oeste. A Bacia Este Venezuelana tem sido subdividida em duas sub-bacias, Guaricó e Maturin.



Figura 3.6. Bacias petrolíferas venezuelanas com base na suas províncias sedimentos. E.B.L. El Baul Linement, limite das bacias Este e Barinas-Apure. (Well Evaluation Conference, 1997)

Na Formação Oficina, os principais mecanismos de trapeamento para as sub-bacias Guárico e Maturin (flanco sul) são os sistemas de falhas extensionais do Mioceno. Especificamente, o sistema Querecual-Oficina refere-se só à área de Oficina (perto da fronteira sul Guárico-Anzoátegui) na sub-base Guárico, localizada ao sul dos estados de Guárico e Anzoátegui.

Na Formação Oficina, acredita-se que os hidrocarbonetos tenham sido gerados desde as rochas fontes do Mioceno. Os arenitos da mesma formação são os reservatórios, porém uma quantidade baixa do óleo pode ter escapado à Formação Merecure que subjaz, junto com as trapas falhas-extensionais formadas durante o Mioceno superior. A rocha fonte da sobrecarga pode estar relacionada com o levantamento do Range Mountain Interior ao flexura litosférica resultante que gera o falhamento extensional. O momento crítico é no presente.

Na Figura 3.7 são apresentados as definições estratigráficas gerais para a Faja del Orinoco.

LOCAÇÃO 1: PROGNÓSE DO POÇO

Todas as profundidades estão dadas em pés abaixo do nível do solo. Elevação típica do solo: 500ft

	FRETES	Poço Vertical	Poço Horizontal	Intercalações de argilas laváveis moles e areias de grão grosso.	
					160'
MIOCENO	FM. OFICINA SUP.	400'	400'	Camadas métricas de areias finas a pobremente consolidadas intercaladas com folhelhos betuminosos levemente calcáreos e moderadamente enrijecidos e argilas laváveis. A pirita é freqüente. Camadas finas de calcáreo duro.	
		1050'		Camdas locais de carvão	
	FM. OFICINA MÉDIA	1500'		Argilas na sua maior parte lignítica enrijecidas e localmente pirítica e folhelhos. Poucas camadas finas de areia média não consolidada. Presença de camadas de 1 até 15 ft de espessura de calcáreo cremoso duro.	
		1640'		Abundantes camadas de carvão	
	FM. OFICINA INFERIOR	A		Camadas métricas de areia não consolidada fina a grossa com folhelhos moderadamente duros. A proporção de areia incrementa-se do topo A até o topo B. As camadas de carvão são comuns no topo. Presença de camadas métricas de calcáreo duro.	
		B			
		C	9-5/8"	7"	Camadas compactas A/A de calcáreo arenítico fino a grosso, folhelho e argilo comuns no top. Raro na base.
		D	1900'		
		E	2100'		Camadas de até 100 f de espessura de areia média a grossa e intercaladas com camadas de argila moderadamente dura e folhelho fissil.
	CRETÁCEO	TIGRE	2150'		Camadas métricas de areia média a muito grossa e microconglomerados intercalados com argila lavável moderadamente dura.
2300'				Intercamadas métricas de areias cimentadas, de firmeza dura e argila pastosa marron-avermelha.	
CANOVA		2450'		Argila dura verde olivo	
CAMBR.	CARRIZAI				

Figura 3.7. Definições estratigráficas gerais para a Faja del Orinoco. (Dusseault, 2006).

Segundo Dusseault (2006), a geologia da Faja del Orinoco apresenta muita variabilidade, porém, podem se distinguir três tipo de fontes (*sources*) na Faja: as areias superiores, médias e inferiores (areias U, M e L, respectivamente). Cada uma delas requer estratégias de recuperação acentuadamente diferentes. Estas areias são definidas como:

- **Areia U:** areias finas superiores, geralmente menor que 20 m de espessura, lateralmente descontínuas, viscosidade entre 3000 e 6000 cP, permeabilidade entre 0,5 e 3,0 D, com presença de água no fundo ou nos lados. Admita-se que estas areias geralmente compreendem um grupo pequeno de reservatórios, possuem entre 30 e 35% do OOIP (óleo original *in-situ*) na Faja (estas areias correspondem usualmente às unidades A, B e parte superior da unidade C).
- **Areias M:** areias médias até as areias do canal inferior, usualmente de espessura maior que 15-20 m, com boa continuidade lateral, viscosidade

entre 1000 e 3000 cP, algumas camadas com mais de 8-10 D, com água no fundo ou nos lados. Estes estratos são, nos quatro grandes complexos paleodeltas nos depósitos do Orinoco, na sua maior parte lateralmente contínuos, embora a espessura possa mudar radicalmente e podem existir regiões onde o conteúdo de argila seja alto, particularmente nas áreas distantes dos quatro grandes deltas. Admita-se que esta zona tem entre 50-60% do OOIP (as areias M usualmente correspondem às unidades baixas C, unidade D e parte da unidade E).

- **Areias L:** as areias do canal espesso inferior, usualmente maior que 15-20 m de espessura com boa continuidade lateral, viscosidade entre 1000 e 3000 cP, algumas camadas com permeabilidade maior que 8-10 D, porém com um aquífero ativo no fundo ou nos lados conectados hidráulicamente com o óleo devido à presença do contato óleo-água. As zonas expostas ao aquífero ativo são admitidas como tendo entre 10-20% do OOIP. As areias L que estão hidráulicamente conectadas com o aquífero ativo estão na unidade E principalmente, algumas vezes na unidade D, muito raramente na unidade C, dependendo da localização do contato óleo-água.