
USO DE SISTEMAS DE PROJEÇÃO TRANSVERSA DE MERCATOR EM OBRAS DE ENGENHARIA

ROVANE MARCOS DE FRANÇA¹

LEONEL EUZÉBIO DE PAULA NETO²

RAFAEL AUGUSTO DOS REIS HIGASHI³

Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC ^{1,3}
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PPGEC ^{1,3}
Instituto Federal de Santa Catarina – IFSC ^{1,2}
rovane@ifsc.edu.br, leonel@ifsc.edu.br, rrhigashi@gmail.com

RESUMO – A necessidade do Georreferenciamento está consolidada no cadastro técnico há alguns anos, mas ainda não é realidade em obras de engenharia e levantamentos topográficos urbanos. A topografia no Brasil historicamente sempre foi tratada sobre um plano topográfico horizontal e muitos profissionais ainda o fazem desta forma. Com a popularização dos sistemas GNSS e dos softwares no Brasil, o georreferenciamento de informações pôde ser aplicado em áreas da engenharia que não detém conhecimento de geodésia ou cartografia. Nos projetos de engenharia passou-se a adotar os sistemas de projeção Transversa de Mercator, sendo o mais comum o UTM, mas que trouxeram complicações nas execuções das obras em virtude da falta de profissionais capacitados em geodésia. Este artigo apresenta de forma prática metodologia para tratamento dos dados geodésicos de campo para implantação de obras de engenharia. É possível adotar os conceitos geodésicos e dos sistemas de projeção em obras, de forma bastante simplificadas, garantindo a qualidade mínima exigida para as obras, evitando assim prejuízos financeiros e de tempo, quando no uso das informações para outras finalidades.

ABSTRACT - The need for georeferencing is consolidated in the technical cadastral a few years ago, but there is no reality in engineering works and urban topographic surveys. The topography in Brazil has been historically treated on a horizontal topographic plan and many professionals still do it this way. With the popularization of GNSS systems and software in Brazil, the georeferencing information could be applied in areas of engineering that holds no knowledge of geodesy and cartography. In Engineering projects was used the systems Transverse Mercator projection, the most common being the UTM, but they brought complications in the executions of works due to lack of trained professionals in geodesy. This paper presents a practical methodology for processing of geodetic field data for the implementation of civil works. Is Possible adopt the geodetic and projection systems concepts in the engineering works, quite simplified way ensuring minimum quality required for the works, thus avoiding financial and time losses when the use of the information for other purposes.

1 INTRODUÇÃO

As vantagens de informações georreferenciadas já não são novidades nem tampouco desconhecidas dos profissionais de engenharia. Projetos de engenharia necessitam estar georreferenciados permitindo que durante os seus desenvolvimentos possa se analisar estudos e interferências com equipamentos urbanos, gasodutos, oleodutos, redes de transmissão, rodovias e demais obras civis.

No Brasil, a popularização do sistema NAVSTAR GPS (Sistema de Posicionamento Global via satélites) trouxe a necessidade emergente da disseminação dos conhecimentos de geodésia. As medições feitas por GPS foram sendo incluídas nos levantamentos topográficos, onde os procedimentos foram se popularizando, mas os conhecimentos não. A formação de profissionais que atuam em topografia no Brasil, historicamente sempre foi voltada a um plano topográfico horizontal tratado de forma totalmente isolada de outros levantamentos. A necessidade de tratamento geodésico adequado e uso de projeção cartográficas, acabavam sendo aplicadas apenas na confecção de bases cartográficas de áreas extensas.

Isto se deu pela dificuldade de implantação de uma rede suficientemente densa, associada ao desenvolvimento científico tardio no país, sendo notório somente nas últimas décadas. A necessidade de uma rede de referência surge juntamente com a popularização do georreferenciamento mais preciso de informações.

As inconsistências de dados georreferenciados em obras de engenharia é fato observável na execução. Termos são recorrentes na execução da obra como “o projeto não bate”, onde são detectadas diferenças na implantação quando se utiliza procedimentos não apropriados para o georreferenciamento.

Poucos cursos de engenharia civil possuem em seu currículo uma disciplina de geodésia. O mais comum são poucas horas de topografia, insuficientes para aprofundamento geodésico adequado para sedimentação deste importante conhecimento. Os cursos que tem a disciplina de geodésia, normalmente apontam para a geodésia celeste ou teórica, não dando a devida importância para aplicações práticas, como implantação de obras com projetos georreferenciados.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Sistema de projeção topográfica

A NBR 13133/1994 da ABNT, define o Sistema de Projeção Topográfica, também conhecido como Sistema Topográfico Local, como sendo o sistema de projeção utilizado nos levantamentos topográficos pelo método direto clássico para a representação das posições relativas dos acidentes levantados, através de medições angulares e lineares, horizontais e verticais, cujas características são:

- as projetantes são ortogonais à superfície de projeção, significando estar o centro de projeção localizado no infinito;
- a superfície de projeção é um plano normal à vertical do lugar no ponto da superfície terrestre considerado como origem do levantamento, sendo seu referencial altimétrico referido ao datum vertical brasileiro;
- o plano de projeção tem a sua dimensão máxima limitada a 80 km, a partir da origem.

2.2 Projeções Cartográficas

Segundo Cintra (2004), Sistema de Projeção é o modo como se correlacionam os pontos da superfície terrestre com suas representações planas.

Souza e Garnés (2012) afirma que do ponto de vista da Cartografia convencional, a representação de pontos de um elipsoide num plano, se dá por uma correspondência biunívoca (correspondência matemática com a transformação direta e a transformação inversa definidas de maneira única) a uma superfície de projeção desenvolvível no plano. A superfície, neste caso, pode ser um próprio plano, um cone ou um cilindro.

Ainda segundo Souza e Garnés (2012), quando a projeção é efetuada surgem às deformações pela incompatibilidade da representação curva nas superfícies desenvolvíveis no plano, e a projeção ganha sua particularidade dependendo do tipo de deformação ocorrida (angular, linear e área). Cintra (2004) diz que estas distorções são inevitáveis pela própria natureza. Nogueira (2009) afirma que qualquer sistema de projeção representará a superfície da terra com deformações, as quais serão tanto maiores quanto mais extensa for a área em consideração.

Para Projetos e ante-projetos de engenharia, em que se necessita conhecer a escala, e onde a precisão é algo importante, adotam-se sistemas conformes, principalmente o UTM (Cintra 2004). Diz-se que uma projeção cartográfica é conforme quando a forma dos pequenos objetos é conservada (Gaspar 2005), mas não sua escala. Isso significa que mantemos os ângulos muito próximo do real, quando de sua projeção sobre a superfície a ser planificada, as distâncias sofrem deformações. Esta é uma característica muito importante para os projetos de engenharia.

Dentre as projeções mais populares estão as derivadas da Transversa de Mercator. A Projeção Transversa de Mercator é uma projeção cilíndrica conforme, em que o eixo da superfície de projeção é colocado perpendicular ao eixo de rotação da Terra. Este importante aspecto é mais adequado à representação de regiões com grande desenvolvimento em latitude, pouco variando a escala neste sentido (Gaspar 2005). Na direção da longitude a sua extensão é bastante reduzida para evitar grandes deformações que trariam falta de linearidade da escala de deformação.

A seguir, as características das projeções cartográficas baseadas na Transversa de Mercator.

Projeção	Amplitude do fuso	Fator de escala no meridiano central (K_0)	N no Equador (Hemisférios Norte e Sul)	E no Meridiano Central
Gauss-Krugüer	3°	1	0 e 5.000.000	200.000
Gauss-Tardi	6°	0,999333	0 e 5.000.000	500.000
UTM	6°	0,9996	0 e 10.000.000	500.000
RTM	2°	0,999995	0 e 5.000.000	400.000

LTM	1°	0,999995	0 e 5.000.000	200.000
-----	----	----------	---------------	---------

Tabela 1 – características dos sistemas Transversa de Mercator (Netto, Tostes e Idoeta 2008)

Com os parâmetros do sistema de projeção definido, o fator de escala que deformará as distâncias elipsoidais (De) poderá ser calculado pela equação 1, conforme Oliveira e Silva (2012).

$$K = K_0 / (1 - (\cos \varphi_m \cdot \text{sen} (\lambda_m - \lambda_{MC}))^2)^{1/2} \quad (1)$$

obter a distância sobre a projeção TM (DTM), é necessário utilizar a distância sobre o elipsoide (superfície de referência para a geodésia) e o fator escala da projeção fazendo da seguinte forma, segundo Cintra (2004):

$$DTM = De \cdot K \quad (2)$$

2.3 Reduções nas distâncias

Os equipamentos de topografia convencionais, medem ângulos e distâncias com referência a um plano perpendicular à vertical identificada pelo equipamento. Para a adoção de uma projeção cartográfica, é necessário que a distância medida em campo seja reduzida a uma única superfície matemática de referência que represente a forma da Terra, ou seja, o elipsoide (figura 1).

A primeira redução necessária é ao horizonte, quando medida com medidor eletrônico (estação total ou distanciômetro). Da trigonometria extraímos que:

$$DH = DI \cdot \cos Z \quad (3)$$

,onde DH é a distância sobre o plano horizontal, DI é a distância inclinada e Z o ângulo zenital.

Na sequência é necessário reduzir a DH ao nível médio dos mares (coincidente com o geóide), pois a DH foi medida numa determinada altitude média (H). Conforme Cintra (2004), o cálculo pode ser realizado pela seguinte equação:

$$Dn = DH \cdot (1 - H / R) \quad (4)$$

,onde Dn é distância geoidal ao nível médio dos mares e R é o raio da Terra na latitude média entre os pontos medidos.

Finalmente precisamos reduzir a Dn para o elipsoide (De), onde Silveira (1990) apresenta a equação:

$$De = Dn + (1,027 \cdot Dn^3 \cdot 10^{-15}) \quad (5)$$

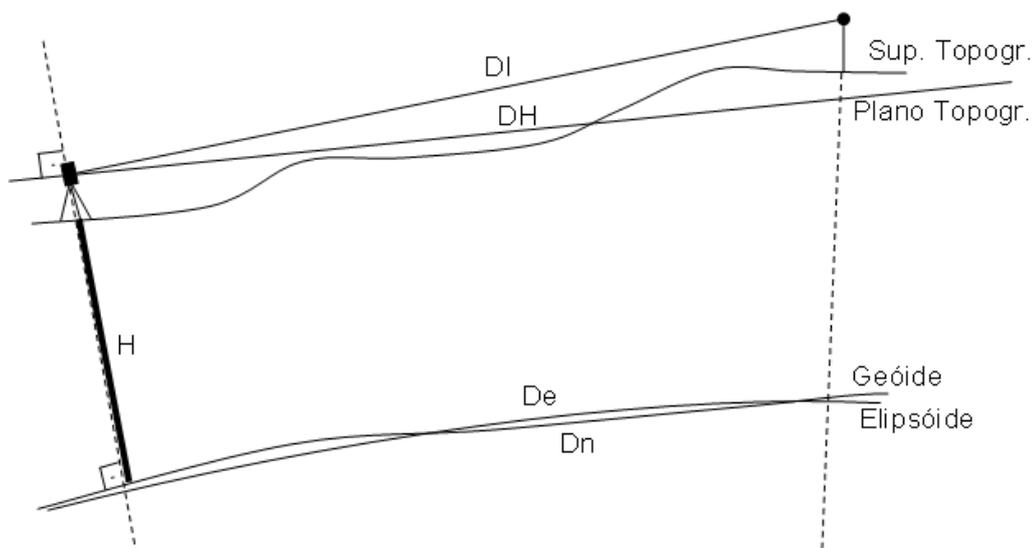


Figura 1 – Redução da distância medida para o elipsoide

A redução do Geóide para o Elipsoide aplicando a equação 3 é imperceptível na prática, pois apresenta valor inexpressivo, devendo ser considerado em distâncias individualmente medidas maiores que 10 km (Sherrer 1985, *apud* Moraes 2004), conforme podemos visualizar na figura 1.

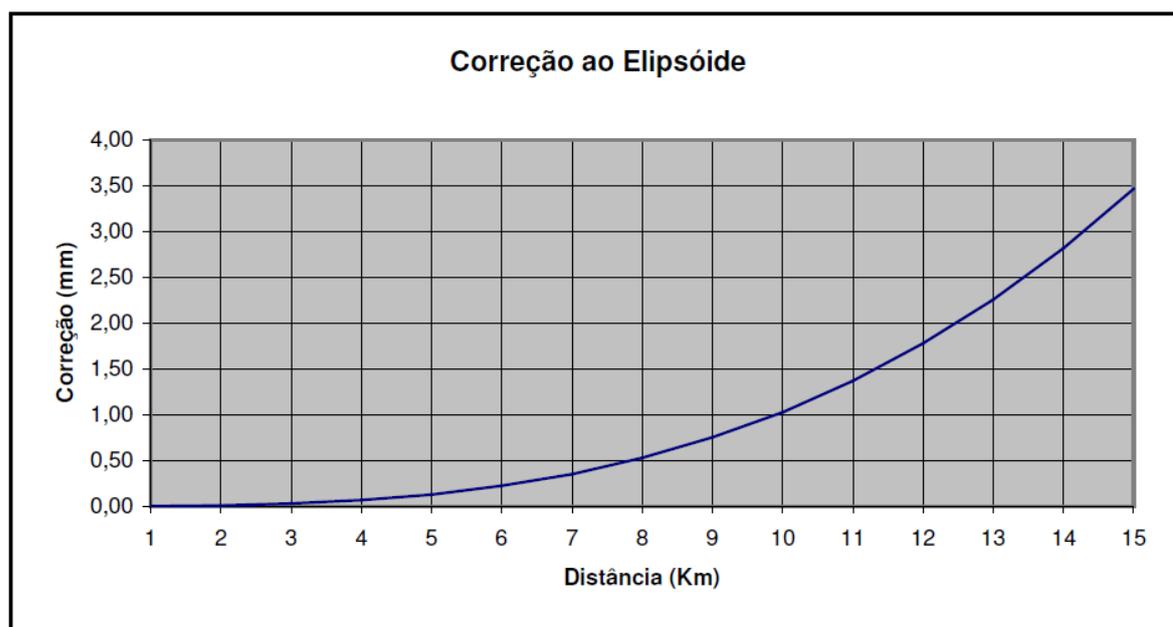


Figura 1 – Deformação da Dn para reduzi-la à De (Morais 2004)

2.4 Posicionamento GNSS RTK

O Sistema Global de Navegação por Satélite - GNSS (Global Navigation Satellite System) conquistou os profissionais pela simplicidade da aplicação, redução de auxiliares, maior precisão e principalmente pela falta de redes de referência densa o suficiente. A consequência da adoção desta técnica, além de aumentar a precisão acabou reduzindo os custos operacionais.

A técnica GNSS RTK (Real Time Kinematics – Cinemático em Tempo Real) é um posicionamento diferencial onde o processamento para a resolução das ambiguidades inteiras é realizado em tempo real utilizando a inicialização OTF (On The Fly) (MONICO, 2008). Isso permite que tenhamos em campo instantaneamente durante a medição a solução encontrada (fixa, flutuante, parcial ou somente código C/A) além da precisão posicional na horizontal e na vertical.

O processamento é feito no receptor móvel e para isso, os dados do receptor de referência deve ser transmitido para o receptor móvel. Existem algumas soluções de transmissão:

- via rádio UHF/VHF/Bluetooth: A estação de referência deve ser equipada um rádio modem transmissor que transmitirá os dados via rádio para uma estação móvel, que se utiliza destas informações para determinar sua posição com precisão (Junior e Krueger 2007).
- via GSM (celular): a estação de referência efetua comunicação GSM diretamente com a estação móvel utilizando celular para a transmissão dos dados.
- via NTRIP (Networked Transport of RTCM via Internet Protocol): a estação de referência transmite os dados via internet para um servidor, onde o receptor móvel irá se conectar para baixar instantaneamente os dados necessários para o processamento em tempo real (IBGE 2014).

4 CÁLCULO SIMPLIFICADO DAS DEFORMAÇÕES

Na implantação de uma obra de engenharia, as distâncias comumente medidas são de poucas centenas de metros, e quando muito chegam a 1 ou 2 km. Como não teremos na prática distâncias maiores do que 10km, podemos adotar que $D_e = D_n$, conforme vimos no item 2.3.

Uma Observação muito importante é que todas as projeções cartográficas deformam a distância sobre a superfície elipsoidal e não a distância medida em campo.

Portanto para calcularmos a deformação de uma projeção cartográfica, é necessário aplicar a redução das distâncias horizontais medidas sobre o elipsoide. Chamaremos de fator de redução (F_r), o fator de escala que deforma a D_H em D_n .

$$F_r = 1 - H / R \quad (6)$$

A NBR 14166/1998, apresenta o fator de elevação (c), que é o inverso do Fr :

$$C = (R + H) / R \quad (7)$$

A mesma NBR 14166/1998 simplifica o cálculo de c, pois o valor de H é muito pequeno se comparado com R:

$$c = 1 + 1,57 \cdot 10^{-7} \cdot H \quad (8)$$

Desta forma o valor de R é aproximadamente 6370000m, permitindo escrever a equação 5 da seguinte forma:

$$Fr = 1 - H / 6370000 \quad (9)$$

Portanto, se substituirmos a equação 8 na 3, teremos:

$$Dn = DH \cdot Fr \quad (10)$$

Adotando na prática $De = Dn$, podemos escrever:

$$De = DH \cdot Fr \quad (11)$$

Da equação 2 e 11, podemos concluir que:

$$DTM = DH \cdot K \cdot Fr \quad (12)$$

Fazendo a unificação do fator de escala e do fator de redução, chegamos no fator de escala unificado Kr:

$$Kr = K \cdot Fr \quad (13)$$

Portanto, podemos calcular a Distância sobre a projeção TM a partir da Distância Horizontal aplicando a seguinte equação:

$$DTM = DH \cdot Kr \quad (14)$$

3 IMPLANTAÇÃO DE OBRAS DE ENGENHARIA

Atualmente, as obras de engenharia georreferenciadas são implantadas utilizando basicamente 2 técnicas: GNSS RTK e Estação Total.

3.1 GNSS RTK

Pela praticidade, precisão obtida, facilidade nos cálculos, redução de auxiliares de topografia e redução dos custos dos equipamentos, a técnica RTK está sendo utilizada cada vez com frequência maior.

Para a implantação é o processamento em tempo real é fundamental, pois é necessário saber a coordenada da ocupação instantaneamente para a comparação imediata com a coordenada de projeto, permitindo que se faça o deslocamento buscando encontrar o ponto a ser implantado.

Com as informações do posicionamento, incluindo as precisões e as soluções, o profissional pode decidir em campo se o posicionamento atende a finalidade da obra ou não.

O posicionamento do ponto é obtido pelas suas coordenadas cartesianas geocêntricas 3D, onde o software de processamento em campo pode transformar imediatamente para uma projeção cartográfica conforme o projeto, incluindo o Sistema Geodésico de Referência. Desta forma, o posicionamento GNSS é nativamente georreferenciado, não necessitando qualquer cálculo adicional para a implantação de pontos na obra.

3.2 Estação Total

A estação total atualmente é o equipamento básico de topografia. Como o GNSS possui grandes restrições em função de obstáculos acima do horizonte, a estação total ainda se mantém como solução para muitos casos de obras de engenharia.

A partir de pontos coordenadas de projeto, em qualquer projeção TM, é necessário transformá-la para coordenadas polares (ângulos e distâncias) para então executar a implantação dele em campo. O ângulo deve ser o azimute de quadrícula (azimute plano), ângulo utilizado para orientação dos sistemas TM.

Segundo Codeplan (1976), No cálculo dos lados, a partir de coordenadas plano-retangulares do sistema, há que considerar, obrigatoriamente, o coeficiente de deformação linear K e a correção ao nível médio dos mares. A mesma Codeplan recomenda desprezar a redução angular para projetar os azimutes de quadrícula para o plano topográfico, já que as projeções cilíndricas deformam de forma insignificativa os ângulos.

A partir das coordenadas planas na projeção TM, podemos calcular a DTM que deverá ser demarcada em campo para a implantação do ponto georreferenciados. Como a Estação Total mede a DH sobre o plano topográfico local (na verdade calculada a partir da DI e ângulo zenital, conforme equação 2) será necessário transformar a DTM em DH, para então demarcar ela. Adotando a equação 13, isolamos a DH:

$$DH=DTM/Kr \quad (14)$$

De maneira geral, as estações totais tiveram um desenvolvimento tardio em se tratando dos softwares internos. Os fabricantes desenvolveram softwares bastante poderosos, porém eles estão embarcados em estações totais que possuem valor de comercialização acima do padrão de mercado. Com isso, se perdura ainda no mercado internacional como padrão, equipamentos que não fazem o processamento geodésico apropriado de forma automatizada, exigindo do usuário conhecimento para poder entender e alimentar o software adequadamente.

Com os pontos notáveis de projeto introduzidos na estação total, através de suas coordenadas georreferenciadas num determinado sistema de projeção, será necessário identificar no manual a forma que a estação total processa os dados, transformando a DTM em DH. Para a finalidade de cálculos geodésicos, existem no mercado duas categorias de estações totais:

- **modelos mais sofisticados:** exige a configuração do datum e sistema de projeção para a obra e a ET calcula as deformações automaticamente para cada coordenada comparando as distâncias de forma adequada. Operacionalmente os cálculos são transparentes para o usuário, onde fica bastante simples a operação de campo. Estes modelos normalmente possuem um custo maior no mercado e ainda não são padrão de mercado.

- **modelos mais básicos:** exige do profissional a introdução dos fatores de escala (K e Fr, ou diretamente o Kr) para cada estação ocupada. Desta forma a estação total poderá calcular a DTM e transformar automaticamente em DH para comparar com a distância medida. São as estações padrão de mercado, porém muitos profissionais que atuam em obras não possuem conhecimento para o tratamento geodésico adequado. Os fatores de escala podem ser aplicados diretamente nas distâncias ou somente ao calcular as coordenadas no sistema de projeção, dependendo de cada modelo e fabricante.

4 CONCLUSOES

É fundamental que seja adotado em campo durante a implantação de obras de engenharia os fatores de deformação, tanto o fator de escala da projeção (K), quanto o fator de redução (Fr). Existem estações totais no mercado que permitem os cálculos totalmente automáticos, não necessitando qualquer cálculo prévio ou no campo por parte do profissional, eliminado grande parte de erros grosseiros.

Na literatura, temos muitos autores afirmando que a LTM possui deformação mínima, por este motivo é indicada para projetos de engenharia. Porém como vimos, a deformação deve ser considerada a partir da distância horizontal medida em campo, sendo considerado inclusive o fator de redução (Fr) . Por este motivo, qualquer um dos sistemas de projeção podem sofrer deformações acentuadas, não significando que uma determinada projeção que deforme menos num determinado local terá deformação desprezível.

A deformação não implica em erro. Pouco importa a projeção adotada, pois isso não afetará a qualidade do trabalho. O erro passa a existir quando a deformação não é aplicada, e a propagação deste pode comprometer o georreferenciamento da obra.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas: **NBR13.133 - Execução de levantamento topográfico**. Rio de Janeiro, 1994.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas: **NBR14.166 – Rede de Referência Cadastral Municipal**. Rio de Janeiro, 1998.

CINTRA, J. P. **Sistema de Projeção UTM**. Informações Espaciais II – Notas de Aula. 11ª ed. p. 41-102, 2004.

CODEPLAN. **Projeto do sistema cartográfico do Distrito Federal – SICAD**. Companhia de Desenvolvimento do Planalto Central, Brasília. 213p. 1976.

GASPAR, J. A. **Cartas e projeções cartográficas**. 3ª ed. Editora Lidel, Lisboa. 331p. 2005.

IBGE. **RBMC-IP - Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS em tempo real**. Disponível em: < <http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/rbmc/ntrip/>>. Acesso: 10 julho 2014.

JUNIOR, J. F.; KRUEGER, C. P. **Posicionamento RTK empregando diferentes estações de referência**. Revista Brasileira de Cartografia, numero 59/02, p137-144, 2007.

MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo NAVSTAR – GPS: Descrição, Fundamentos e Aplicações**. Editora UNESP, São Paulo. 2008.

MORAIS, R. V. **Estudo de projeções geodésicas no cadastro técnico urbano - análise de fechamento de poligonais**.

NETTO, N. P.; TOSTES, F.; IDOETA, I. V. **Características dos sistemas TM**. Informações Espaciais II – Notas de Aula. 11ª ed. p. 103-138, 2004.

OLIVEIRA, R. N. Q.; SILVA, D. C. **Sistemas de projeção transversa de mercator no georreferenciamento de imóveis rurais**. IV Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, 2012.

NOGUEIRA, R. E. **Cartografia: representação, comunicação e visualização de dados espaciais**. 3a ed. Florianópolis. 327p. 2009.

SILVEIRA, L. C. **Cálculos geodésicos no sistema UTM aplicados a topografia**. Ed. Luana, 2a Ed. 166p. Morro da Fumaça, 1990.

SOUZA, W. O.; GARNÉS, S. J. A. **Análises de projeções cartográficas para grandes escalas**. IV Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, 2012.