



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

FACOLTÀ DI SCIENZE MM. FF. NN.

Dipartimento di Geoscienze
Direttore Prof. Cristina Stefani

TESI DI LAUREA MAGISTRALE
IN
GEOLOGIA E GEOLOGIA TECNICA

**PRIMA VALUTAZIONE DELL'IDONEITÀ
SOTTOSUOLO SUDAFRICANO ALL'IMPIEGO
DI SISTEMI GEOTERMICI PER LA
CLIMATIZZAZIONE**

*Relatore: Prof. Antonio Galgaro
Correlatore: Ing. Wolfgang Fels*

Laureando: Paolo Greggio

ANNO ACCADEMICO 2014/ 2015

INDICE

ABSTRACT	11
SOMMARIO	12
1. INTRODUZIONE	13
2. INQUADRAMENTO DEL SUDAFRICA	15
2.1 GEOGRAFIA	15
2.2 GEOLOGIA.....	17
2.3 IDROGRAFIA E IDROGEOLOGIA	21
2.4 CLIMA	23
3. AREE DI STUDIO	27
3.1 JOHANNESBURG-PRETORIA	28
3.1.1 <i>Geologia e acquiferi</i>	28
3.1.2 <i>Clima</i>	52
3.2 DURBAN	54
3.2.1 <i>Geologia e acquiferi</i>	54
3.2.2 <i>Clima</i>	65
3.3 CAPE TOWN.....	67
3.3.1 <i>Geologia e acquiferi</i>	67
3.3.2 <i>Clima</i>	78
4. GEOTERMIA E SISTEMI GEOTERMICI DI BASSA ENTALPIA	80
4.1 GENERALITÀ DELLA GEOTERMIA DI BASSA ENTALPIA.....	80
4.2 SISTEMI GEOTERMICI A CIRCUITO CHIUSO	82
4.2.1 <i>Sonde geotermiche verticali</i>	82
4.2.2 <i>Scambiatori geotermici orizzontali</i>	85
4.2.3 <i>Funzionamento di un sistema geotermico a circuito chiuso</i>	88
4.3 SISTEMI GEOTERMICI A CIRCUITO APERTO	89
4.3.1 <i>Configurazioni e funzionamento di sistemi geotermici a circuito aperto</i>	91
4.4 L'ACCUMULO TERMICO	93
5. I PARAMETRI PER LA VALUTAZIONE GEOTERMICA	99
5.1 STATO DELL'ARTE	100
5.2 LA CARTOGRAFIA: I PARAMETRI	102
5.2.1 <i>Proprietà geologiche</i>	102
5.2.2- <i>Proprietà idrogeologiche</i>	108
5.2.3- <i>Proprietà termo-fisiche</i>	113

6. LE MAPPE DI IDONEITÀ	126
6.1 MAPPE DI IDONEITÀ ALLO SCAMBIO TERMICO PER SISTEMI OPEN LOOP.....	126
6.2 MAPPE DI IDONEITÀ ALLO SCAMBIO TERMICO PER SISTEMI CLOSE LOOP	133
7. DISCUSSIONI	139
CONCLUSIONI.....	144
BIBLIOGRAFIA	147
WEBGRAFIA.....	156

INDICE FIGURE

<i>Figura 1. Carta topografica del Sudafrica</i>	16
<i>Figura 2. Carta geologica del Sudafrica</i>	18
<i>Figura 3. Mappa delle principali province geologiche del Sudafrica con sovrapposta la mappa della sismicità del Paese.</i>	20
<i>Figura 4. Mappa della conducibilità elettrica</i>	22
<i>Figura 5. Mappa delle precipitazioni medie annue</i>	24
<i>Figura 6. Mappa dei climi del Sudafrica.</i>	25
<i>Figura 7. Mappa della radiazione solare nel territorio sudafricano</i>	26
<i>Figura 8. Aree di studio.</i>	27
<i>Figura 9. Carta geologica e legenda dell'area di Johannesburg</i>	32
<i>Figura 10. Carta idrogeologica dell'area di Johannesburg.</i>	34
<i>Figura 11. Rendimento dei pozzi nel West Rand Group.</i>	35
<i>Figura 12. Chimica delle acque del West e Central Rand Group</i>	36
<i>Figura 13. Rendimento dei pozzi nel West Rand Group.</i>	37
<i>Figura 14. Rendimento dei pozzi nella Black Reef Formation</i>	38
<i>Figura 15. Chimica delle acque della Black Reef Formation, Magaliesberg, Daspoort Formation e Rayton Formations</i>	39
<i>Figura 16. Rendimento dei pozzi nella Magaliesberg Formation</i>	41
<i>Figura 17. Rendimento dei pozzi per il Chuniespoort Group</i>	43
<i>Figura 18. Il grafico mostra la ricarica degli acquiferi dolomitici in funzione della quantità delle piogge cadute durante l'anno</i>	44
<i>Figura 19. Chimica delle acque del Chuniespoort Group</i>	45
<i>Figura 20. Rendimento dei pozzi per il Basement Complex</i>	46
<i>Figura 21. Chimica delle acque del Basement Complex</i>	47
<i>Figura 22. Rendimento dei pozzi della Timeball Hill</i>	48
<i>Figura 23. Chimica delle acque del Basement Complex e della Silverton Formation</i>	49

<i>Figura 24. Rendimento dei pozzi della Silverton Formation</i>	50
<i>Figura 25. Rendimento dei pozzi delle Hekpoort Formation.....</i>	51
<i>Figura 26. Chimica delle acque della Hekpoort Formation</i>	52
<i>Figura 27. Distribuzione mensile delle temperature medie massime e minime per l'area di Johannesburg.....</i>	53
<i>Figura 28. Distribuzione mensile del numero di giorni e dei mm di pioggia nell'area di Johannesburg</i>	53
<i>Figura 29. Carta geologica dell'area di Durban.</i>	57
<i>Figura 30. Carta idrogeologica dell'area di Durban.....</i>	59
<i>Figura 31. Il grafico mostra il rendimento del Maputaland Group.....</i>	60
<i>Figura 32. Diagramma di Piper che descrive la geochimica degli acquiferi intergranulari.</i>	61
<i>Figura 33. Il grafico mostra il rendimento dei pozzi nel Natal Group e Msikaba Formation.....</i>	62
<i>Figura 34. Il grafico mostra il rendimento dei pozzi nel Dwyka Group.....</i>	62
<i>Figura 35. Diagramma di Piper che descrive la geochimica degli acquiferi fratturati.....</i>	63
<i>Figura 36. Il grafico mostra il rendimento dei pozzi nella Natal Metamorphic Province.....</i>	64
<i>Figura 37. Il grafico mostra il rendimento dei pozzi nell'Ecce Group.....</i>	64
<i>Figura 38. Diagramma di Piper che descrive la geochimica degli acquiferi intergranulari-fratturati.....</i>	65
<i>Figura 39. Distribuzione mensile delle temperature medie massime e minime per l'area di Durban.</i>	66
<i>Figura 40. Distribuzione mensile del numero di giorni e dei mm di pioggia nell'area di Durban.</i>	66
<i>Figura 41. Carta geologica dell'area di Cape Town.</i>	68
<i>Figura 42. Carta idrogeologica dell'area di Cape Town.....</i>	69
<i>Figura 43. Rendimento dei pozzi nel Malmesbury Group</i>	70
<i>Figura 44. Chimica delle acque relativa ai campioni A,B,C nel Malmesbury Group.....</i>	71

<i>Figura 45. Rendimento dei pozzi nel Table Mountain Group.....</i>	<i>72</i>
<i>Figura 46. Chimica delle acque relativa ai campioni A,B,C nel Table Mountain Group.....</i>	<i>73</i>
<i>Figura 47. Rendimento dei pozzi nel Cape Granite Suite.</i>	<i>74</i>
<i>Figura 48. Chimica delle acque relativa ai punti di misura A,B,C nel Cape Granite Suite.....</i>	<i>75</i>
<i>Figura 49. Rendimento dei pozzi nel Sandveld Group.....</i>	<i>76</i>
<i>Figura 50. Chimica delle acque relativa ai punti di misura A,B,C nel Sandveld Group.....</i>	<i>77</i>
<i>Figura 51. Distribuzione mensile delle temperature medie massime e minime per l'area di Cape Town.</i>	<i>79</i>
<i>Figura 52. Distribuzione mensile del numero di giorni e dei mm di pioggia nell'area di Cape Town.</i>	<i>79</i>
<i>Figura 53. Tipologie di sonde verticali.....</i>	<i>83</i>
<i>Figura 54. Diverse tipologie di sonde orizzontali.....</i>	<i>87</i>
<i>Figura 55. Schema del funzionamento di un impianto geotermico a circuito chiuso</i>	<i>88</i>
<i>Figura 56. Schema di un tipico impianto a circuito aperto ad acqua di falda.....</i>	<i>91</i>
<i>Figura 57. Configurazioni impiantistiche per gli impianti open-loop.....</i>	<i>93</i>
<i>Figura 58. Fasi dell'accumulo termico.....</i>	<i>94</i>
<i>Figura 59. Radiazione solare distribuita nell'arco dell'anno, accoppiata alla domanda di calore.</i>	<i>94</i>
<i>Figura 60. Schema del funzionamento di un sistema di accumulo termico in acquifero</i>	<i>96</i>
<i>Figura 61. Schema di un accumulo termico in caverna.....</i>	<i>96</i>
<i>Figura 62. Schema di funzionamento di una sistema di accumulo a sonde geotermiche verticali.....</i>	<i>97</i>
<i>Figura 63. Carta geologica della zona di Johannesburg.</i>	<i>104</i>
<i>Figura 64. Carta geologica della zona di Durban.....</i>	<i>106</i>
<i>Figura 65. Carta geologica della zona di Cape Town.</i>	<i>107</i>

<i>Figura 66. Mappa sulla profondità della tavola d'acqua della zona di Johannesburg.</i>	<i>110</i>
<i>Figura 67. Mappa sulla profondità della tavola d'acqua della zona di Durban.</i>	<i>111</i>
<i>Figura 68. Mappa sulla profondità della tavola d'acqua della zona di Cape Town.</i>	<i>112</i>
<i>Figura 69. Mappa d'idoneità all'utilizzo di sistemi geotermici a circuito aperto dell'area di Johannesburg.</i>	<i>130</i>
<i>Figura 70. Mappa d'idoneità all'utilizzo di sistemi geotermici a circuito aperto dell'area di Durban.</i>	<i>131</i>
<i>Figura 71. Mappa d'idoneità all'utilizzo di sistemi geotermici a circuito aperto dell'area di Durban.</i>	<i>132</i>
<i>Figura 72. Mappa d'idoneità all'utilizzo di sistemi geotermici a circuito chiuso dell'area di Johannesburg.</i>	<i>136</i>
<i>Figura 73. Mappa d'idoneità all'utilizzo di sistemi geotermici a circuito chiuso dell'area di Durban.</i>	<i>137</i>
<i>Figura 74. Mappa d'idoneità all'utilizzo di sistemi geotermici a circuito chiuso dell'area di Durban.</i>	<i>138</i>

INDICE TABELLE

<i>Tabella 1. Geochimica delle acque del West Rand Group.</i>	36
<i>Tabella 2. Geochimica delle acque del Central Rand Group.....</i>	37
<i>Tabella 3. Geochimica delle acque della Black Reef Formation.</i>	39
<i>Tabella 4. Geochimica delle acque della Daspoort Formation.....</i>	40
<i>Tabella 5. Geochimica delle acque della Magaliesberg Formation.....</i>	41
<i>Tabella 6. Geochimica delle acque per il Chuniespoort Group.....</i>	44
<i>Tabella 7. Geochimica delle acque per il Basement Complex.</i>	46
<i>Tabella 8. Geochimica delle acque Timeball Hill.....</i>	48
<i>Tabella 9. Geochimica delle acque della Silverton Formation.</i>	50
<i>Tabella 10. Geochimica delle acque della Hekpoort Formation.....</i>	51
<i>Tabella 11. Geochimica delle acque nel Malmesbury Group.....</i>	71
<i>Tabella 12. Geochimica delle acque nel Table Mountain Group</i>	73
<i>Tabella 13. Geochimica delle acque nel Cape Granite Suite.....</i>	75
<i>Tabella 14. Geochimica delle acque nel Sandveld Group</i>	77
<i>Tabella 15. Diffusione degli impianti geotermici nel Mondo.....</i>	82
<i>Tabella 16. Proprietà dei diversi tipi di anticongelante</i>	85
<i>Tabella 17. Caratteristiche delle acque da utilizzare per sistemi open-loop</i>	90
<i>Tabella 18. Litologia e durezza delle rocce (Johannesburg).</i>	105
<i>Tabella 19. Litologia e durezza delle rocce (Durban).</i>	107
<i>Tabella 20. Litologia e durezza delle rocce (Cape Town).</i>	108
<i>Tabella 21. Tipologie di acquiferi per dell'area di Johannesburg.....</i>	109
<i>Tabella 22. Tipologia di acquiferi dell'area di Durban.</i>	110
<i>Tabella 23. Tipologia di acquiferi dell'area di Cape Town.</i>	111
<i>Tabella 24. Conducibilità termica delle litologie di Johannesburg</i>	120
<i>Tabella 25. Conducibilità termica delle litologie di Durban</i>	120

<i>Tabella 26. Conducibilità termica delle litologie di Cape Town</i>	<i>121</i>
<i>Tabella 27. Media delle temperature mensili annue di Johannesburg</i>	<i>123</i>
<i>Tabella 28. Media delle temperature mensili e annue per l'area di Durban.</i>	<i>124</i>
<i>Tabella 29. Media delle temperature mensili e annue di Cape Town</i>	<i>124</i>
<i>Tabella 30. Classi di idoneità dei rendimenti dei vari acquiferi.....</i>	<i>128</i>
<i>Tabella 31. Classi di idoneità della profondità della tavola d'acqua.....</i>	<i>128</i>
<i>Tabella 32. Gradi di idoneità per le mappe sui sistemi a circuito aperto.</i>	<i>129</i>
<i>Tabella 33. Classi di idoneità della conducibilità termica</i>	<i>134</i>
<i>Tabella 34. Classi di idoneità della durezza delle rocce</i>	<i>134</i>
<i>Tabella 35. Gradi di idoneità per le mappe sui sistemi a circuito chiuso.</i>	<i>135</i>

Abstract

In recent years, the increase in energy requirements, along with a growing awareness in curbing gas emissions and pollutants, has promoted a growth of new technologies to save energy and the production of energy from renewable sources. Geothermal energy is the more recent interest in research and experimentation; in particular, the exploitation of thermal energy through systems of geo-exchange, and it stands for versatility and economic feasibility, proposing a large range of technologies, solutions and combinations with various installations of production of energy existing. This work aims to create thematic maps on the suitability of the South African underground for use of low enthalpy geothermal systems to be applied to the air conditioning of buildings. South Africa is a vast country, with geology, hydrology and climate extremely variable. For this reason, in this thesis we have studied the urban areas of Johannesburg, Durban and Cape Town, because they are the major urban centers of the country. Thematic maps proposals are the result of the combination of geological, hydrological, climatic and thermo-physical parameters to represent the suitability of the underground to use of low enthalpy geothermal systems that may be in open closed loop. The thematic maps proposals are the result of the combination of geological, hydrological, climatic and thermo-physical parameters to represent the suitability of the underground for use of low enthalpy geothermal systems. we have realized the suitability maps for open and close loop systems of the Johannesburg, Durban and Cape Town areas.

Sommario

Negli ultimi anni l'incremento del fabbisogno energetico, insieme ad una crescente consapevolezza nel contenere le emissioni di gas serra ed inquinanti, ha promosso una crescita delle tecnologie volte al risparmio energetico e alla produzione di energia da fonti rinnovabili.

La geotermia costituisce, tra queste, il più recente fronte d'interesse per la ricerca e la sperimentazione. In particolare lo sfruttamento di energia termica attraverso sistemi di geo-scambio, spicca per versatilità e fattibilità economica, proponendo uno svariato numero di tecnologie, soluzioni e combinazioni con i vari impianti per la produzione di energia già esistenti.

Questo lavoro propone di realizzare delle carte tematiche sull'idoneità del sottosuolo sudafricano all'utilizzo di sistemi geotermici di bassa entalpia da applicare alla climatizzazione di edifici. Il Sudafrica è un Paese molto vasto, con fattori geologici, idrogeologici e climatici estremamente variabili. Per questo motivo, nel presente scritto si sono studiate le aree urbane di Johannesburg, Durban e Cape Town, in quanto maggiori centri urbani del Paese. Gli elaborati proposti sono frutto della combinazione di parametri geologici, idrogeologici, climatici e termo-fisici per meglio rappresentare l'idoneità del sottosuolo all'utilizzo di sistemi geotermici di bassa entalpia che possono essere a circuito aperto o chiuso.

1. Introduzione

Il consumo massivo di combustibili fossili che da decenni si protrae su scala mondiale, è giunto ormai ad un'imminente ed inevitabile diminuzione. I motivi che portano a tale diminuzione e che conducono ad una parziale sostituzione di tali fonti energetiche, stanno innanzitutto nella necessità di ridurre le emissioni di CO₂, SO_X e NO_X in atmosfera, oltre all'esaurimento di molti giacimenti naturali di idrocarburi e dell'imminente insufficienza di quelli residui. Negli ultimi anni però, la richiesta mondiale di energia si è mostrata in continuo aumento a causa della costante crescita della popolazione globale e dell'industrializzazione, che si sta particolarmente intensificando nei paesi emergenti (Cina, India, Sudafrica e Brasile) e di recente industrializzazione (Messico, Turchia, paesi del Sud-est asiatico e dell'Africa mediterranea).

Per queste ragioni molti Paesi hanno deciso di rafforzare i propri sforzi al fine di incrementare l'impiego di tecnologie volte al risparmio energetico e all'utilizzo di energie da fonti rinnovabili, le cui soluzioni impiantistiche sono in continuo sviluppo con un'esponenziale crescita nel mercato dei paesi industrializzati. Tra le nuove tecnologie volte al risparmio energetico, la geotermia, ai giorni d'oggi costituisce una delle possibili soluzioni energetiche, forse la più interessante, per garantire al Pianeta un futuro migliore e basato sulle risorse che esso offre e che sono disponibili in misura illimitata e rinnovabile. In particolare, lo sfruttamento di energia termica attraverso sistemi di geo-scambio, spicca per versatilità e fattibilità economica, proponendo uno svariato numero di tecnologie, soluzioni e combinazioni con i vari impianti di produzione di energia già esistenti.

Per geotermia s'intende lo sfruttamento di una risorsa naturale offerta dal Pianeta per produrre energia o utilizzare il sottosuolo come scambiatore di calore. Considerata la continua infrastrutturazione di tutto il Pianeta e l'incremento dei gas serra da essa prodotta, la geotermia offre una soluzione ideale per ridurre l'inquinamento atmosferico. Esistono essenzialmente tre tipologie di geotermia: di alta entalpia, di media entalpia e di bassa entalpia. Le prime due tipologie sono legate allo sfruttamento del calore terrestre di alta e media temperatura come

manifestazioni vulcaniche o termali, mentre in questa tesi ci si dedicherà, e si cercherà di valorizzare la geotermia di bassa temperatura. Gli impianti geotermici generalmente possono essere a circuito chiuso o a circuito aperto. Gli impianti a circuito chiuso sfruttano delle sonde poste nel terreno o nella roccia, e all'interno di tubature poste dentro di esse circola un fluido termovettore che può accumulare o dissipare calore. Gli impianti a circuito aperto invece servono anch'essi per scambiare calore con il sottosuolo ma lo fanno tramite dei pozzi che arrivano alla falda; l'acqua può essere prelevata e/o reimpressa in acquifero come mezzo per scambiare calore con l'impianto di climatizzazione. La soluzione geotermica di bassa entalpia accoppiata a pompe di calore, talvolta rappresenta una soluzione molto interessante laddove ci siano le caratteristiche geologiche e climatiche idonee e vantaggiose all'utilizzo di questi innovativi impianti.

Considerato ciò, questa tesi affronterà uno studio basato sui sistemi di geoscambio in uno dei Paesi emergenti sopra elencati, ovvero il Sudafrica, attraverso una valutazione dei fattori che determinano l'idoneità del sottosuolo all'utilizzo di sistemi geotermici di bassa entalpia, espressi secondo mappe d'idoneità verso tali impianti. Al fine di arrivare a questi risultati è stata necessaria una prima fase di indagine e raccolta dati nelle aree oggetto di studio (Johannesburg, Durban e Cape Town) fondamentali per la realizzazione del lavoro.

Le proprietà rilevanti del sottosuolo che interessa conoscere per la caratterizzazione geotermica possono essere racchiuse in tre categorie: mineralogico-petrografiche, idrogeologiche e termofisiche. La valutazione dell'idoneità del sottosuolo all'utilizzo di sistemi geotermici di bassa entalpia, si articola principalmente in due fasi: la selezione e classificazione dei parametri da utilizzare e, l'integrazione di questi in mappe tematiche di geoscambio attraverso sistemi informatici come GIS. I parametri normalmente utilizzati per la caratterizzazione geotermica, come sopra scritto sono di natura geologica, idrogeologica, geofisica e termo-fisica. Tali parametri dunque vengono classificati in funzione della loro attitudine al geo-scambio, per la realizzazione di mappe d'idoneità del sottosuolo allo scambio termico, per sistemi open e close-loop.

2. Inquadramento del Sudafrica

2.1 Geografia

Il Sudafrica è situato nell'estremità meridionale del Continente africano e confina a Nord con la Namibia, il Botswana e lo Zimbabwe, a Nord-Est con il Mozambico e lo Swaziland; al suo interno è presente lo stato del Lesotho (figura 1). Oltre alla parte continentale, appartengono al Sudafrica anche le Isole del Principe Edoardo che si trovano a 1.770 km a Sud-Est di Port Elizabeth. La lunga linea costiera è bagnata dall'Oceano Atlantico ad Ovest Sud-Ovest e dall'Oceano Indiano ad Est Sud-Est, con il punto di demarcazione fra i due oceani collocato in corrispondenza di Cape Point, punto più meridionale della piccola penisola che parte da Cape Town e che si estende verso Sud. L'incontro delle due correnti oceaniche influisce fortemente sul clima della costa, in quanto l'Oceano Atlantico è molto freddo mentre l'Indiano decisamente più caldo e spesso causano frequenti marosi, pioggia e tempeste, causando frequenti marosi, pioggia e tempeste.

La geografia interna del paese è dominata da un ampio e complesso sistema di altopiani, in parte desertici o semi-desertici, delimitati da sistemi montuosi di una certa rilevanza, con alcuni dei picchi più elevati dell'Africa meridionale. I fiumi e i laghi sono pochi; tra questi, i fiumi sono il "Tugela" a Nord-Est che sfocia nell'Oceano Indiano e "l'Orange River" che attraversa quasi l'intero paese in direzione Est-Ovest per poi sfociare nell'Oceano Atlantico.

Il territorio del Sudafrica è caratterizzato da una grande varietà di climi, paesaggi, ed ecosistemi. Si possono distinguere tre regioni principali: gli altopiani, le catene montuose e la costa.

Il sistema degli altopiani, cosiddetto Alto Veld, costituisce gran parte del territorio interno del Sudafrica, sviluppandosi a diverse altitudini comprese tra i 900 e i 1800 m s.l.m. L'ambiente predominante è la prateria, che a seconda dell'altitudine e della latitudine si presenta come prateria montana, pianura erbosa o savana; la savana sfuma in ambienti semi-desertici o desertici soprattutto alle basse altitudini. Gli altopiani centrali sono delimitati da una cintura semicircolare di sistemi montuosi che li separa dalla costa.

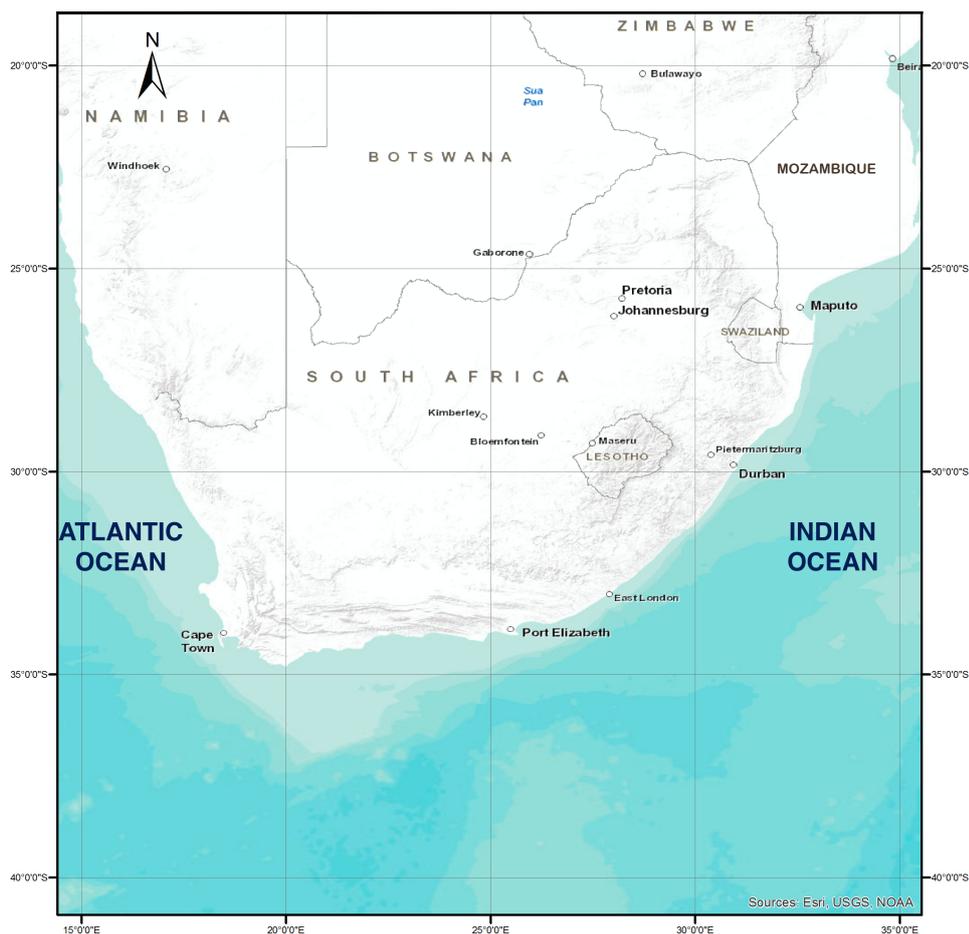


Figura 1. Carta topografica del Sudafrica

Il sistema montuoso predominante è quello della Grande Scarpata, che si articola in diverse catene montuose separate da aree livellate dall'erosione. La Scarpata include a sud-ovest massicci isolati, come Table Mountain (1914m) e un massiccio di arenaria che incombe su Città del Capo. A est e a nord si sviluppano invece importanti catene montuose, dove vengono raggiunte le massime altitudini; le principali sono i monti Drakensberg (Monti dei Draghi), caratterizzati da effusioni basaltiche e cime che toccano altezze superiori ai 3000m, da cui si dividono catene minori (Stormberg, Nieuwveld e Sneeuwberg). Nella zona nordorientale si trovano anche i sistemi montuosi Swartberg e Langeberg.

Al di là della Scarpata si estende la stretta fascia di pianura alluvionale costiera detta Basso Veld che orla quasi tutto il Paese. La costa è generalmente molto regolare con la presenza di spiagge, tranne nella zona Sud-Ovest dove le catene montuose si affacciano direttamente sul mare. In queste aree, ma soprattutto

intorno a Cape Town l'erosione marina ha intagliato in modo pittoresco i rilievi arenacei, originando una successione di promontori, con coste a falesia, e brevi tratti di coste basse. Rimanendo nell'area suddetta, il famoso Cape Point o Capo di Buona Speranza è però un antico isolotto roccioso saldatosi al continente.

All'interno del Paese si trovano altopiani di altezza media tra i 1200 e i 1800 m; si tratta di duomi erosi o pianalti quasi perfettamente tabulari, intagliati dai corsi d'acqua e dominati da modesti rilievi conici, che solo la presenza alla sommità di un cappello di roccia dura ha risparmiato da un completo spianamento.

2.2 Geologia

Dal punto di vista geologico il territorio del Sudafrica è molto antico e particolarmente ricco di risorse minerarie. Le rocce sudafricane appartenevano al supercontinente Gondwana, che circa 130 milioni di anni fa, si è frammentato in più parti costituendo i continenti attuali, compresa l'Africa.

Il territorio sudafricano si imposta su un antichissimo zoccolo di rocce cristalline precambriane, venate da ricchi filoni auriferi e uraniferi nella regione del Witwatersrand situata nella porzione nord est del Paese. In gran parte però tale substrato è ricoperto da sedimenti della più giovane formazione del Karoo, diffusa in tutta l'Africa meridionale ma caratteristica soprattutto della regione del Western Cape ed Eastern Cape. Questa Formazione di età da carbonifera a giurassica risulta economicamente importante per la presenza di vasti giacimenti carboniferi. La superficie sudafricana si corruga solo nell'estrema sezione meridionale, per effetto dell'orogenesi ercinica, generando una serie di catene montuose, con andamento per lo più da E a W, separate da lunghe valli. Nelle depressioni formate da questo corrugamento si sviluppano il Grande Karoo e il Piccolo Karoo, entrambe zone aride dell'entroterra costituite rispettivamente da ambienti semi-desertici a savane e praterie. Dalla carta geologica del Sudafrica (figura 2) (Council for Geoscience, 2003) si possono notare le antiche rocce del basamento cristallino precedentemente descritto, costituito prevalentemente da granitoidi e gneiss di età a partire dall'archeano, poste nel settore nord orientale.

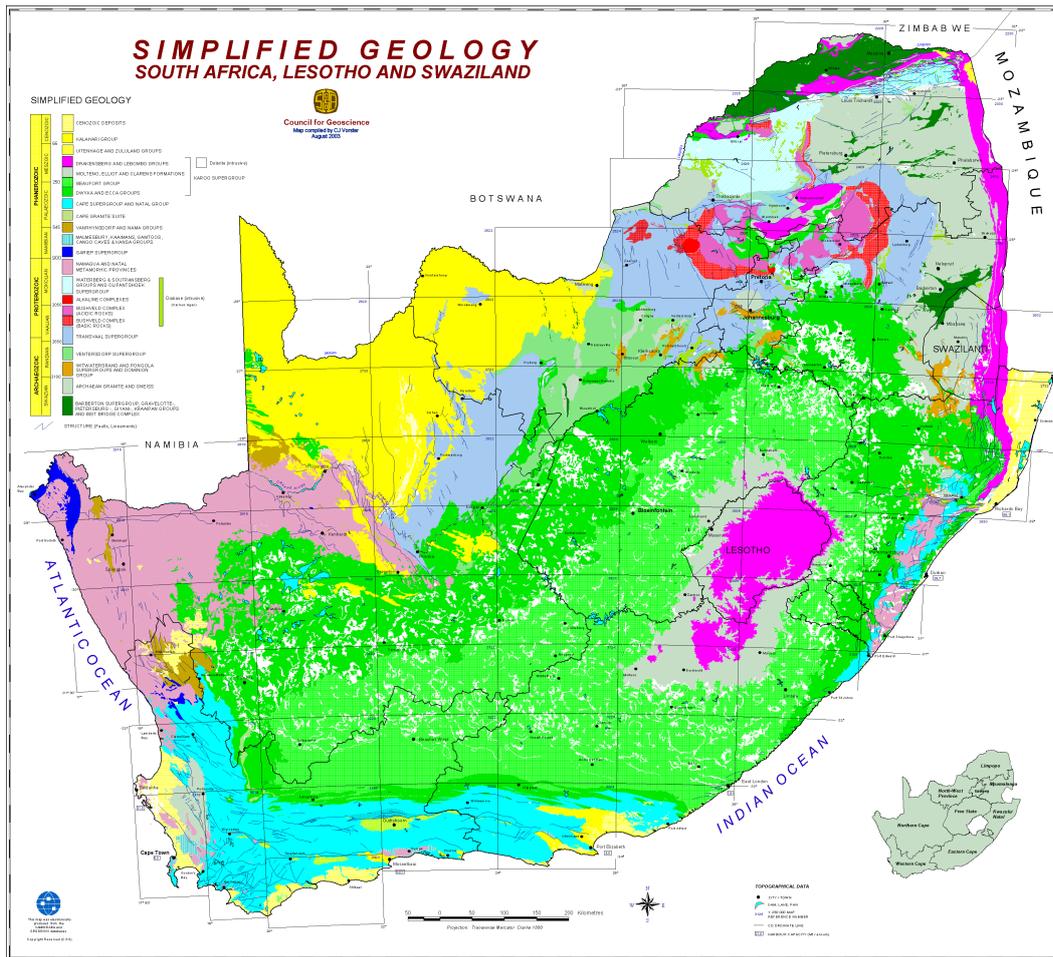


Figura 2. Carta geologica del Sudafrica ("Cuncil for Geoscience" CJ Vorster, 2003).

Sopra al basamento cristallino si può notare come in quasi tutto il paese affiorino rocce più recenti costituite anch'esse da granitoidi o gneiss e le relative coperture. Inoltre sono riportati i depositi cenozoici affioranti nel litorale del paese e nel deserto del Kalahari.

Secondo M. Singh (2009) la mappa in figura 3 (Nauuri et al. ,2001) mette in relazione le principali province geologiche del Sudafrica con una mappa di sismicità. Le Province riportate sono: “Bushveld Complex”, “Limpopo Belt”, “Kaalpvaal Craton”, “Kheiss Graben”, “Namaqua Natal Mobile Belt”, “Cape Fold Belt”, “Witwatersrand Basin”, “Vredefort Dome” e “Karoo Sedimentary cover”. Il Cratone Kaapvaal (KC) è la provincia geologica più antica, di età Archeana e costituisce il basamento su cui le formazioni geologiche del Sud Africa si sono successivamente sviluppate. Una zona di sedimenti metamorfosati sulla zona marginale nord del Cratone Kaapvaal, lo separa dal Cratone Zimbabwe (ZC), che è di età e composizione simile. Si ritiene che questa zona, chiamata Limpopo Belt, si sia formata dal risultato di una collisione tra questi due Cratoni. La suddetta collisione sembra che abbia attivato o riattivato sistemi di faglie trascorrenti fino a 1800 Ma, creando importanti strutture tettoniche come il lineamento Thabazimbi-Murchison, che ha preparato il cratone per lo sviluppo dei bacini Transvaal e Griqualand occidentale di età compresa tra 2600 e 2100My. Il complesso igneo del Bushveld Complex ha intruso il Cratone Kaapvaal circa 2000 Ma. Le rocce di questo periodo testimoniano una complessa storia tettonica tra 1750-1200 Ma, determinata da fasi di rifting, sviluppo di bacini, apertura del bacino oceanico e subduzione collisione tra placche (Wilson, 2005). Le rocce di “Cape Fold Belt”(CFB) sono state formate a partire da sedimenti depositati in un ambiente di delta costiero nell’Ordoviciano (450 Ma), e una volta diagenizzati sono stati piegati nel Carbonifero e Permiano durante la fusione del Supercontinente Pangea. Il Karoo Supergroup è la più grande provincia geologica dell’Africa del Sud, infatti copre parte del Sudafrica (Eastern e Western Cape, la parte occidentale di KwaZulu-Natal e gran parte del Sud-Est Gauteng), Zambia, Zimbabwe, e il Malawi. Le rocce che costituiscono questa Formazione, sono per

lo più scisti e arenarie, e hanno registrato una sequenza quasi continua di glaciazioni marine e fasi interglaciali del tardo Carbonifero al Giurassico, per un periodo di circa 100 Ma. Abbondanti colate di lave sia basiche sia acide dei gruppi Lebombo e Drakensberg, ricoprono il supergruppo Karoo, precedendo la frammentazione del Gondwana.

Il Sudafrica ha iniziato rottura con l'Australia nel Nord-Est del Paese circa 200Ma, proseguendo verso Sud e poi verso Ovest fino alla formazione del Proto-Atlantico circa 120 My. Questo processo geologico è stato accompagnato da un diffuso magmatismo alcalino anorogenico di kimberliti e carbonatiti. Depositi più giovani, di età compresa tra Cretaceo a tempi recenti, costituiscono il gruppo Kalahari, i sedimenti costieri e i sedimenti lagunari e di mare poco profondo (Schlüter T., 2006).

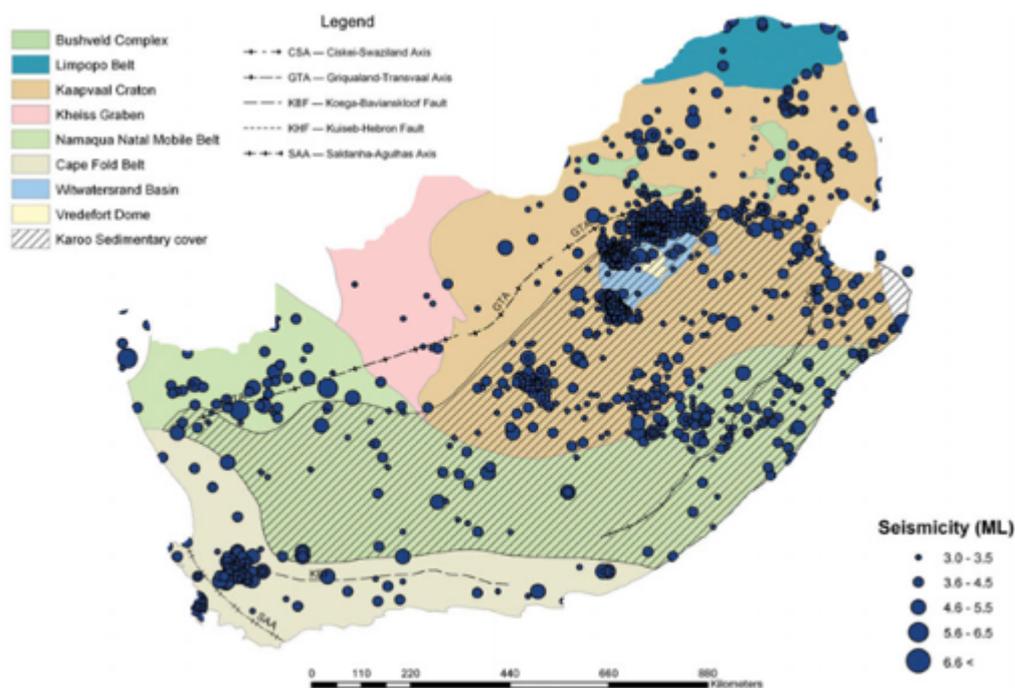


Figura 3. Mappa delle principali province geologiche del Sudafrica con sovrapposta la mappa della sismicità del Paese (Nauuri et al, 2001).

Dal punto di vista tettonico il Sudafrica riconosce tre principali sistemi cinematici che sono dovuti sia a stress interni alla placca africana sia a stress con le altre placche (Zoback M. L., 1992). Campi di stress compressivi ed orizzontali sono

visibili nella parte sud-occidentale del Sudafrica, dove prevale un regime di stress orizzontale Est-Ovest, dominato da forze compressive originate dalla Dorsale Medio-Atlantica che si manifesta in faglie di strike-slip. Un diverso regime di stress è presente nella parte orientale e Nord-orientale del Paese. In queste aree ci sono forze di uplift generate dalla risalita del materiale astenosferico e dall'assottigliamento litosferico. Gli stress massimi sono orientati in direzione verticale, con sistema fagliazione normale o di strike-slip. Nella zona tra le due regioni sopra descritte, vi è una porzione intermedia di elevata topografia, dove il massimo stress rimane verticale e un secondo ma minore campo di stress orientato NW-SE (Nyblade A. A. et al., 1994).

2.3 Idrografia e idrogeologia

Idrograficamente il Paese, è diviso in diversi bacini; il fiume principale è l'Orange, che nasce nel Lesotho dai Monti Maluti e, il cui vasto bacino attraversa buona parte degli altopiani. Il corso del fiume è però accidentato da rapide e cascate che ne rendono difficile la navigazione, ostacolata inoltre dal regime decisamente irregolare. Tra i suoi affluenti hanno una certa importanza il Vaal e il Molopo, che delimita il confine col Botswana, ma che spesso è asciutto. Come l'Orange, versa le proprie acque all'Atlantico anche l'Olifants, che sfocia nella baia di Sant'Elena dopo aver raccolto le acque del Grande Karoo. Tra i tributari all'Oceano Indiano il principale è il Limpopo, che nasce dal Witwatersrand col nome di Krokodil e che drena la sezione settentrionale del Transvaal, interessando poi ampiamente il Mozambico. Anche per il Limpopo l'irregolarità del profilo e del regime pregiudicano la navigazione. Gli altri fiumi nascono quasi tutti sulla Grande Scarpata e presentano un andamento normale alla costa, tra i molti il Tugela che si origina ai confini col Lesotho e forma, con una serie di salti, le cascate omonime. Nella zona del Capo, il rilievo costringe i corsi d'acqua a lunghi percorsi longitudinali prima di riuscire ad aprirsi dei passaggi trasversali, che hanno

offerto agevoli vie alle comunicazioni stradali e ferroviarie. Aride e praticamente prive di corsi d'acqua sono infine le zone nordoccidentali.

Tra i laghi del Sudafrica vi sono il lago Sibhayi, nel Kwazulu-Natal, il Grootvloer, formato dal fiume Sak, e il lago Santa Lucia, nei pressi di Durban. Nel sottosuolo sudafricano sono stati svolti degli studi, come prove geoelettriche ed altre prove geofisiche, per la determinazione a grande scala della conducibilità elettrica la quale varia in funzione del contenuto d'acqua, della litologia ed altri fattori.

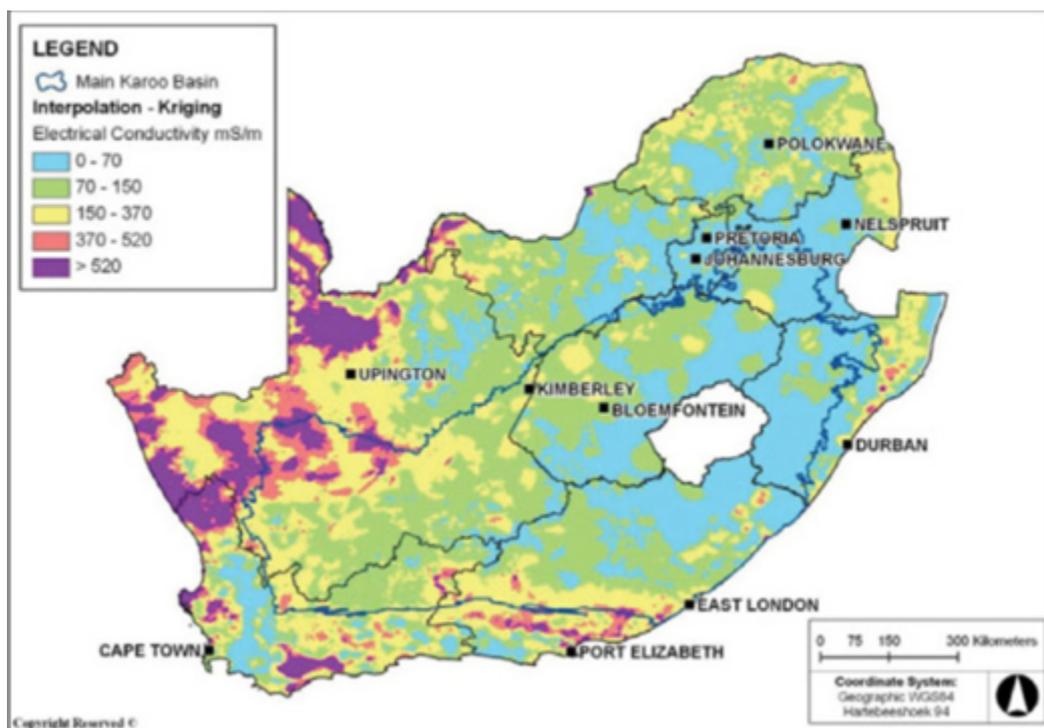


Figura 4. Mappa della conducibilità elettrica (Murray R. et al. , 2012).

Secondo la classificazione adottata da H.C Barnard et al. (2000) utilizzata per descrivere gli acquiferi del Sudafrica, ne sono state riconosciute quattro principali classi:

- Classe A = Intergranulari
- Classe B = Fratturati
- Classe C = Carsici
- Classe D = Intergranulari e fratturati

La “Classe A” ovvero gli acquiferi intergranulari è associata a sedimento non consolidato come sabbia e ghiaia, o a rocce molto alterate al punto da distruggere la loro struttura primaria. In queste condizioni l’acqua viene trasmessa nei vuoti del sedimento che rendono il materiale poroso e permeabile. La categoria di acquiferi fratturati invece è associata a rocce generalmente molto dure e compatte, che a causa del loro comportamento fragile, ospitano fratture, fessure o joints che rendono possibile l’infiltrazione e lo stoccaggio di acqua. Per quanto riguarda gli acquiferi carsici invece, sono associati a rocce carbonatiche come calcari e dolomia, dove l’acqua viene accumulata e trasmessa attraverso cavità carsiche o fratture.

Gli acquiferi intergranulari e fratturati sono dati dalla combinazione di acquiferi della “Classe A” e la “Classe B”. Questa combinazione indica che l’acqua deve essere contenuta e trasmessa orizzontalmente e verticalmente in entrambe le tipologie di acquiferi. In pratica, questa situazione la si trova dove, grazie alla porosità degli acquiferi intergranulari viene ospitata dell’acqua ma che viene trasmessa in profondità grazie a fratture o joints degli acquiferi di tipo fratturato.

2.4 Clima

Il clima del Sudafrica è estremamente vario in funzione della sua grande estensione territoriale, della posizione geografica che occupa, dell’altitudine e dell’esposizione al mare. Vista la latitudine subtropicale e l’influsso marino, sulla costa meridionale il clima è mite; le temperature nella zona di Cape Town oscillano tra una minima invernale intorno ai 7°C e una massima estiva di circa 29°C, con una piovosità, concentrata nella stagione invernale, intorno ai 600mm annui. Queste caratteristiche descrivono un clima mediterraneo e che favorisce lo sviluppo di una vegetazione che ricorda spesso la macchia mediterranea (Cowling R.M. et al., 2015).

Il clima in gran parte del Paese viene classificato come complessivamente semi-arido a causa delle vaste aree desertiche e della savana. Il tratto climatico più

uniforme del paese sono i forti venti, che soffiano quasi tutto l'anno da Sud-Est o da Nord-Ovest, e l'assenza di precipitazioni di rilievo nei mesi estivi. Le precipitazioni (Figura 5) nella zona meridionale, sono legate all'avanzata di fronti freddi di origine antartica durante l'inverno, mentre quasi tutto il resto dell'Africa australe nello stesso periodo è sovrastato da un'area anticiclonica che impedisce l'afflusso di masse d'aria umida degli oceani circostanti. Durante l'estate, quando nel continente s'instaurano condizioni di bassa pressione, le masse d'aria umida dell'aliseo proveniente dall'Oceano Indiano investono le coste orientali e la Grande Scarpata bagnandole con abbondanti precipitazioni (1000– 1500 mm). In particolare il KwaZulu-Natal gode di un clima caldo umido, che fa di questa provincia l'area più favorevole alla coltivazione di colture tropicali. Proseguendo verso l'interno del Sudafrica le precipitazioni diminuiscono infatti sugli altopiani si aggirano sui 500–800 mm annui; andando verso ovest, nel centro del territorio sudafricano si passa ai 400mm a Kimberley, fino ad arrivare ai 60 mm a Port Nolloth, sull'Atlantico.

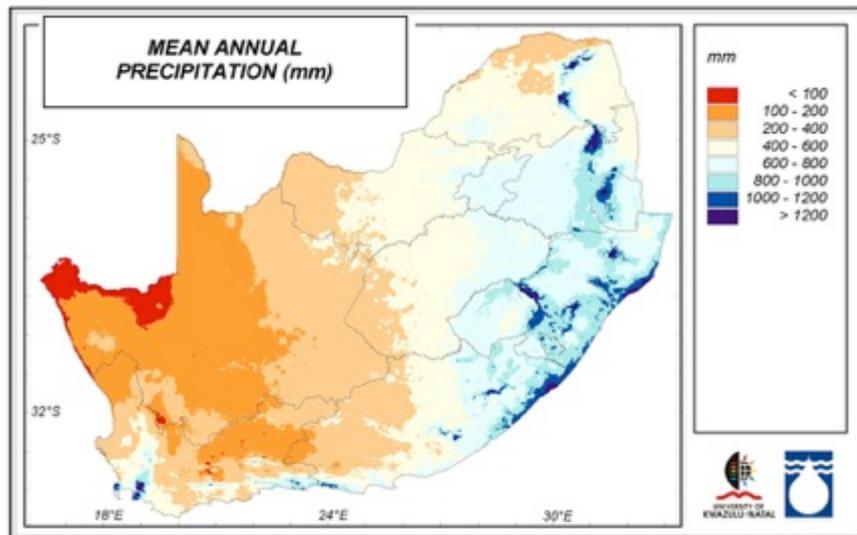


Figura 5. Mappa delle precipitazioni medie annue espresse in mm (University of Kwazulu-Natal).

Per quanto riguarda le escursioni termiche, sono abbastanza forti sugli altopiani, per esempio a Johannesburg che si trova a 1750m s.l.m, le temperature medie oscillano tra i 24°C in estate australe ai 7°C nell'inverno australe, mentre le

variazioni di temperatura nelle coste sono contenute. Le temperature medie delle coste sono estremamente varie in funzione dell'orientazione costiera, infatti lungo le coste che si affacciano sull'Oceano Indiano le temperature medie sono decisamente più calde (a Durban le temperature medie di gennaio e di luglio sono rispettivamente 25°C e 18 °C), mentre lungo le coste atlantiche il clima è più freddo (a Cape Town le temperature medie sono di 22°C a gennaio e 13°C a luglio).

In generale, dunque, si possono registrare i seguenti tipi di clima (figura 6): nella parte orientale dell'altopiano sudafricano un clima subtropicale, asciutto d'inverno e discretamente piovoso d'estate, con caratteri di continentalità e notevoli escursioni termiche; nella metà occidentale dell'altopiano un clima semiarido, con una breve stagione piovosa estiva e un lungo periodo di siccità; lungo la fascia costiera occidentale un clima di tipo desertico, con scarsissime e sporadiche precipitazioni; nella fascia costiera sudoccidentale un clima subtropicale di tipo mediterraneo, con inverni piovosi ed estati calde e asciutte; lungo la fascia costiera sudorientale un clima caldo, con una lunga stagione piovosa estiva di tipo oceanico.

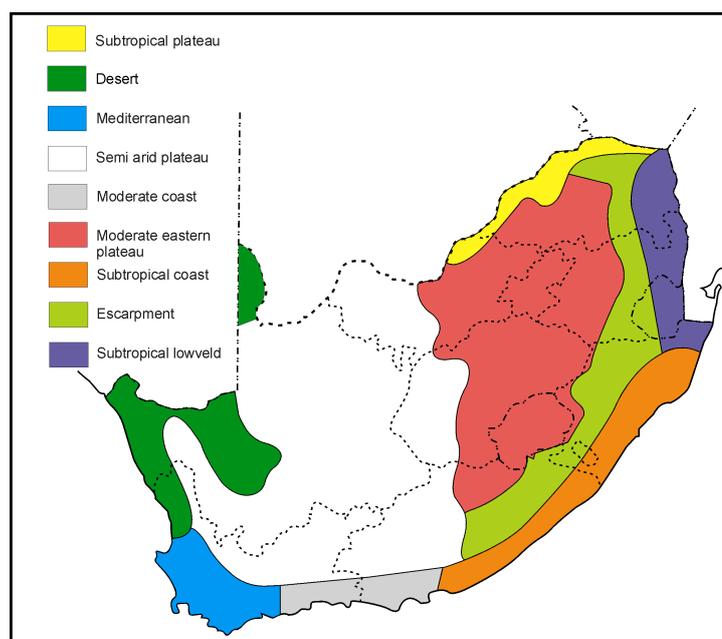


Figura 6. *Mappa dei climi del Sudafrica (OpenStax CNX).*

Infine è interessante, oltre all'aspetto ambientale del clima, vedere come è distribuita la radiazione solare (figura 7) nel territorio sudafricano espressa in kWh/mq, e notare come questa sia fortemente legata alla caratterizzazione delle varie regioni climatiche.

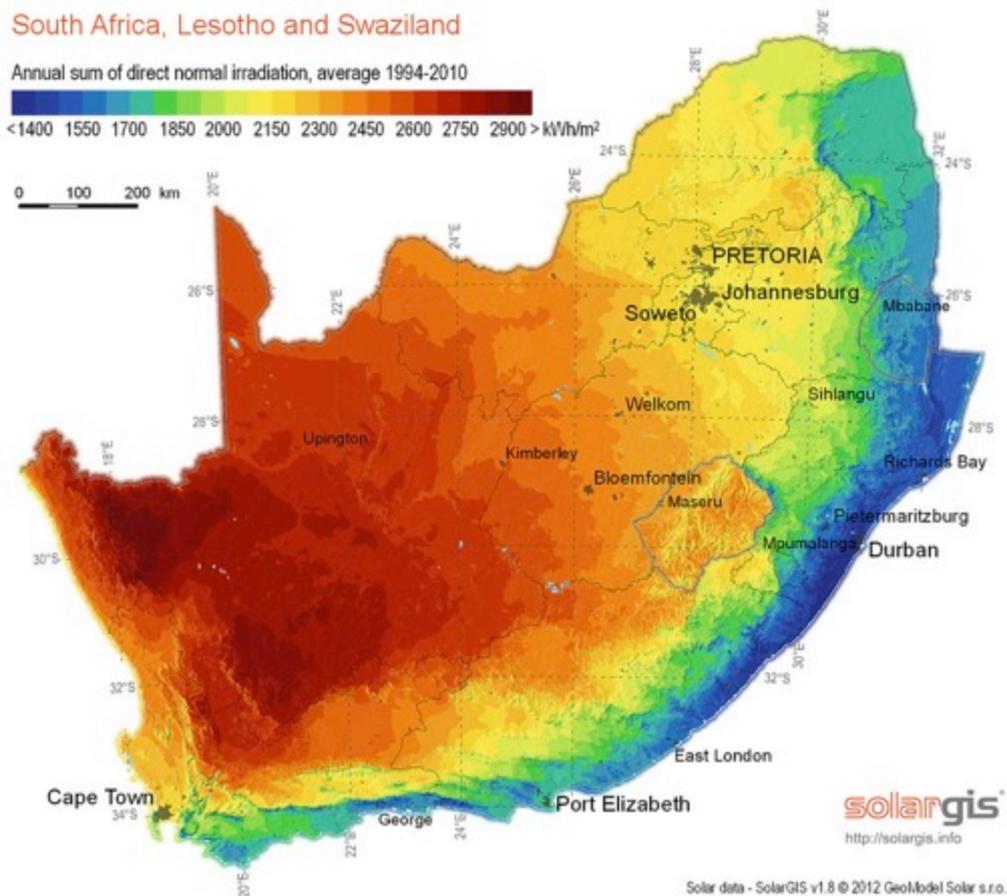


Figura 7. Mappa della radiazione solare nel territorio sudafricano (Solargis, 2012).

3. Aree di studio

Come trattato nel precedente capitolo, il Sudafrica presenta un territorio molto vasto ed estremamente differente dal punto di vista geologico, idrogeologico e climatico. Proprio per questi motivi, ai fini di una caratterizzazione geotermica del sottosuolo, sono state scelte tre principali aree di studio, che meglio rappresentano le diverse caratteristiche del Paese, sia dal punto di vista ambientale che di esigenze per la climatizzazione.

Le tre aree in esame sono la zona compresa tra Johannesburg e Pretoria, l'area urbana di Durban e l'area urbana di Cape Town (figura 8).

Nel successivo paragrafo verrà analizzato rispettivamente la geologia, gli acquiferi ed il clima delle suddette aree in modo da averne una caratterizzazione ai fini dello geo-scambio termico per impianti geotermici di bassa entalpia.

Le tre zone verranno affrontate secondo il seguente ordine:

- Johannesburg-Pretoria;
- Durban;
- Cape Town.

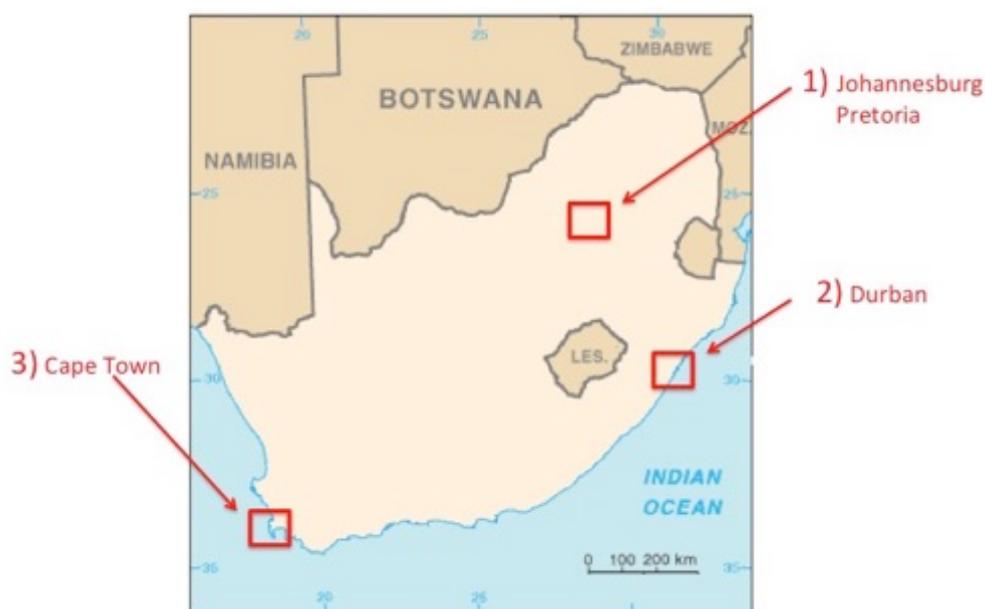


Figura 8. Aree di studio.

3.1 Johannesburg-Pretoria

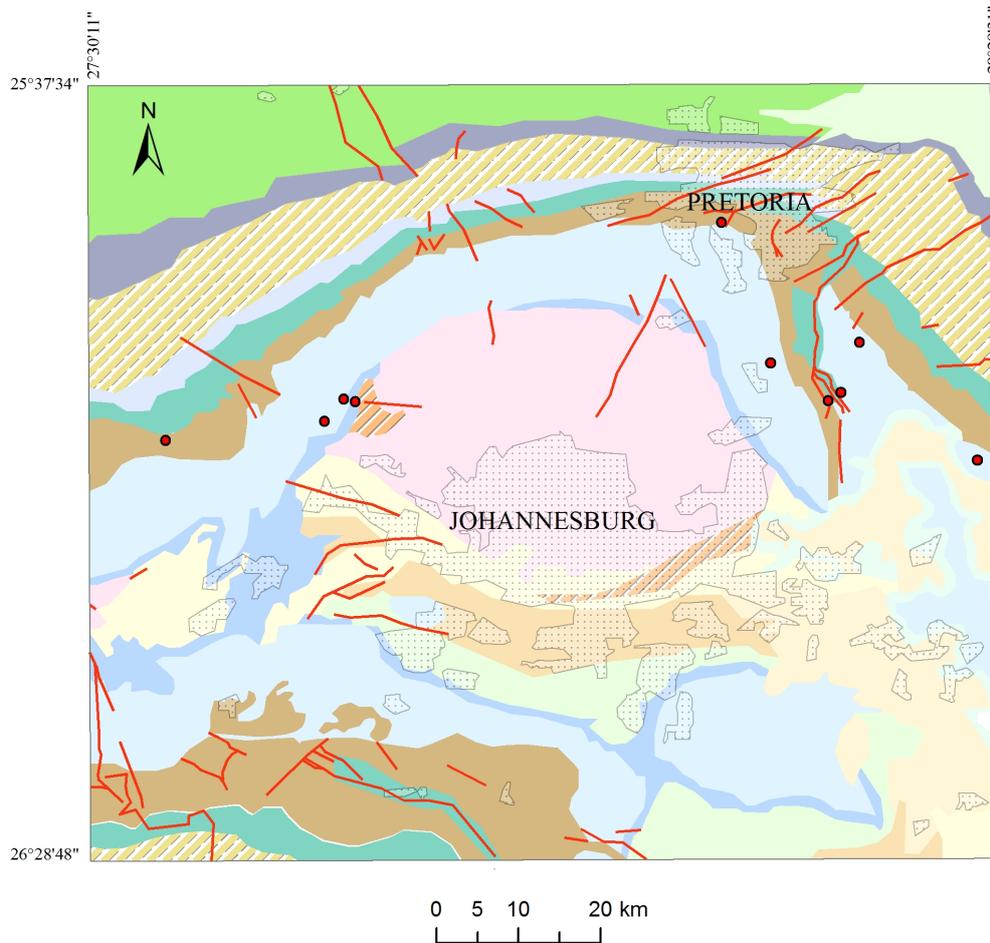
3.1.1 Geologia e acquiferi

Dal punto di vista geologico l'area di Johannesburg-Pretoria si trova su un altopiano di altitudine variabile tra i 1753m di Johannesburg ai 1356m di Pretoria (Tamiru A. A., 2010). Più precisamente l'altopiano è stato formato da un duomo vulcanico, ovvero una struttura geologica dalla forma simile ad una collina dove il rilievo è dato da un'intrusione magmatica che ha spinto verso l'alto l'intera area, ma che non è mai riuscita a fuoriuscire dalle coperture sedimentarie poste sopra a questa. Oggi, Johannesburg giace proprio su una di queste strutture (Anhaeusser C. R., 2015), dove al centro, a causa dell'erosione, affiora quell'antico basamento cristallino, (Anhaeusser C. R., 2011) appartenente al Cratone Kaapvaal (Lenhardt N. et al., 2012) di età archeana, e che ha sollevato il duomo. L'area di Johannesburg è composta principalmente da tre gruppi di rocce (Anhaeusser C. R., 2015; Anhaeusser C. R., 2011; Van Tonder D.M et al., 2010): granitoidi del Basamento cristallino archeano, una serie di coperture sedimentarie metamorfosate che costituiscono il Witwatersrand Supergroup (Agangi A. et al., 2015; Heinrich C. A., 2015; C. Philips G.N. et al., 2015). Un'altra serie di rocce sedimentarie ma non metamorfosate che costituiscono la Tranvaal Sequence (Akinbinu V. A., 2015; Bumby A. J. et al., 2012).

Per quanto riguarda il vecchio Basamento archeano affiora sporadicamente, talvolta bordando il duomo tra la centrale intrusione granitica e la formazione del Witwatersrand Supergroup. Queste antiche rocce sono chiamate "Basement Complex", e sono rappresentate da corpi granulitici di simile ma differente composizione come graniti, granodioriti, gneiss o migmatiti ma tutti di simile età. Il Basement Complex è seguito dal "Dominion Group" che affiora nella zona Ovest di Klerksdrop ed è formato da rocce come quarziti, conglomerati, shale, andesiti e rioliti. Dal punto di vista Cronostratigrafico il gruppo successivo è il "Witwatersrand Supergroup", che affiora nella parte meridionale del duomo di Johannesburg e nella parte settentrionale del duomo di Vrederfort. Questo Supergruppo è suddiviso in "Lower West Rand Group" e "Upper Central Rand

Group” (Tamiru A.A., 2010). La suddetta formazione è composta da due principali suite di rocce: una suite di rocce più vecchie costituite da quarziti, shale ferruginosi, e quarziti con letti di conglomerati ed una suite più giovane formata da areniti e ruditi depositi in un periodo compreso tra 3074 e 2714 My (Robb e Mayer, 1995). La parte del bacino del Witwatersrand che si trova vicino al duomo di Johannesburg è raggruppata in West Rand, Central Rand ed East Rand. Il West Rand è principalmente formato da quarziti e shales; il Central Rand invece è costituito sempre quarziti e shales dove le quarziti contengono livelli di conglomerati (McCarthy, 2006). Successivamente nel primo Proterozoico, si è deposta la “Transvaald Sequence” che comprende una sequenza di rocce quasi indeformate che non hanno subito metamorfismo rappresentate da rocce vulcaniche, quarziti, shales, dolomia, conglomerati e diamictiti (Eriksson e Clendenin, 1990). Questo Supergruppo include come scritto sopra dolomie e formazioni ricche in ferro del “Chuniespoort Group” (Eriksson e Clendenin, 1990) il quale è coperto dal “Pretoria Group”. Il Pretoria Group comprende prevalentemente un’alternanza di argilliti e arenarie quarzose con livelli di lave basaltiche o andesitiche, di conglomerati, diamictiti, e rocce carbonatiche tutte soggette ad un bassissimo e quasi inesistente grado metamorfico (Eriksson et al., 2006). Oltre alle litologie, dalla carta geologica redatta in questa tesi facendo riferimento al lavoro di H.C. Barnard (2000) (figura 9) si notano due sistemi di faglie; il primo orientato in direzione Nord-Est Sud-Ovest, localizzato intorno al duomo di Johannesburg, ed il secondo orientato Nord-Ovest Sud-Est posizionato più a Est rispetto a Johannesburg, verso il deserto del Kalahari. Questi due sistemi di faglie riflettono entrambi un cinematismo normale o di strike-slip dovute alle forze di galleggiamento generate dalla risalita del materiale astenosferico e dall'assottigliamento litosferico(Nyblade A. A. et al., 1994).

CARTA GEOLOGICA DELL'AREA DI JOHANNESBURG



SIMBOLI

- Sorgenti
- Faglie
- ▨ Area urbana

LITOLOGIE

Vryhed Formation (*Paleozoico Medio*)

Questa Formzione fa parte dell'Ecce Group ed è composta da letti di arenarie dalla stratificazione incrociata alternati a letti di shales che contengono carbone. Entrambe le litologie sono intruse da dicchi doleritici.

-  **Dwyka Group** (*Paleozoico Inferiore*)
Depositi glaciali: tilliti.
-  **Rustenburg Layered Suite** (*Proterozoico Inferiore*)
Rocce mafiche come norite, gabbro, gabbro
Magnetite, anortosite e pirossenite.
-  **Magaliesberg Formation** (*Proterozoico Inferiore*)
Quarziti.
-  **Silverton Formation** (*Proterozoico Inferiore*)
Shale intrusi da dicci basici.
-  **Daspoort Formation** (*Proterozoico Inferiore*)
Quarziti con livelli di shale e siltstone.
-  **Hekpoort Formation** (*Proterozoico Inferiore*)
Lava andesitica che spesso si trova alterata in materiale argilloso.
-  **Timeball Hill** (*Proterozoico Inferiore*)
Quarziti alternate a letti di shale.
-  **Chuniespoort Group** (*Proterozoico Inferiore*)
Dolomia.

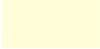
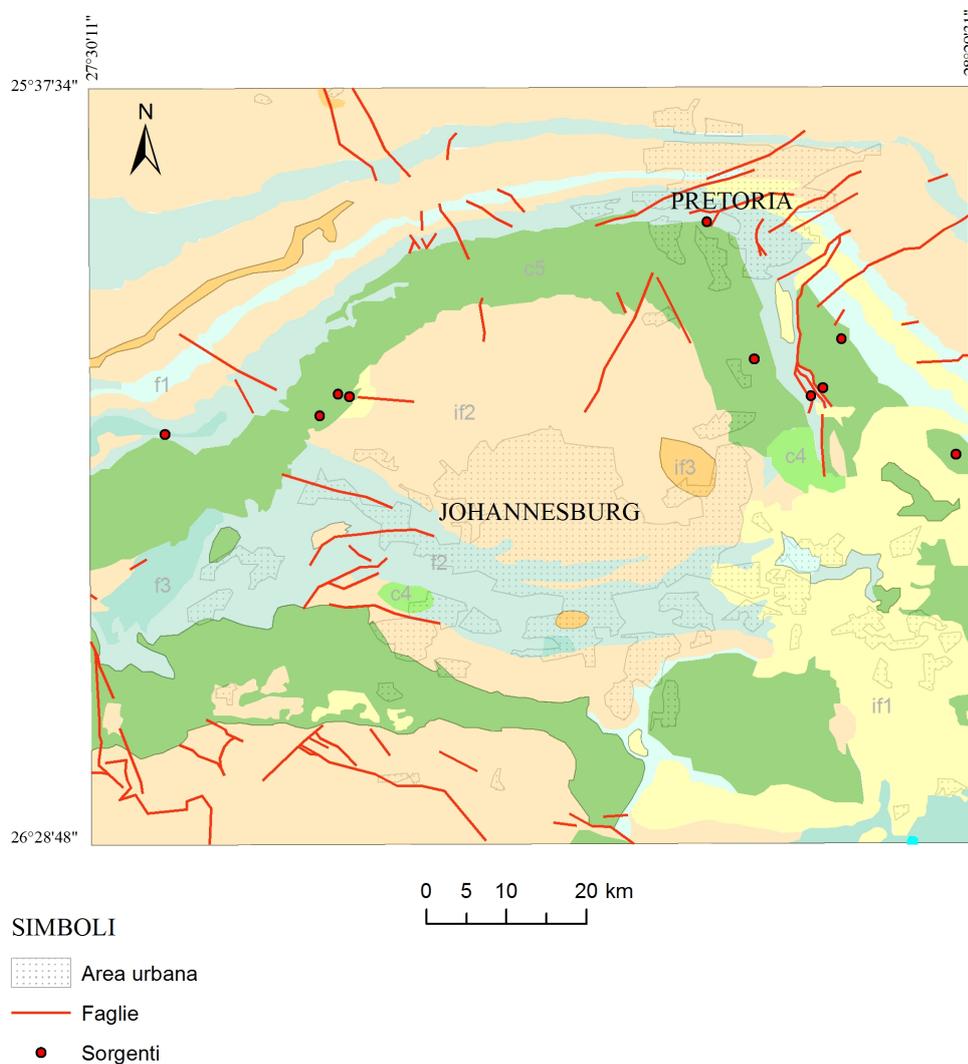
-  **Black Reef Formation** (*Proterozoico Inferiore*)
Quarziti, lenti di conglomerati e shale al top.
-  **Kameeldoorns Formation** (*Neoarcheano*)
Brecce e conglomerati alla base e da shale calcarei e calcari verso il top.
-  **Klipriviersberg Group** (*Neoarcheano*)
Lava andesitica e tufi.
-  **Central Rand Group** (*Mesoarcheano*)
Rocce arenitiche o ruditiche che spesso si trovano molto alterate.
-  **West Rand Group** (*Mesoarcheano*)
Quarzite, shales ferruginosi e quarziti ad orizzonti di conglomerato con intrusioni di dicchi e sills.
-  **Basement Complex** (*Archeano*)
Granito.

Figura 9. Carta geologica e legenda dell'area di Johannesburg (Barnard H.C., 2000).

Dalla Carta idrogeologica di Johannesburg (Bernard H.C., 1999) e rivisitata per questa tesi (Figura 10) si nota che l'area è stata suddivisa secondo quattro principali tipologie di acquiferi, brevemente descritti nel precedente capitolo: intergranulari, fratturati, carsici e intergranulari fratturati. In questa sezione, si andrà ad affrontare ogni litologia affiorante nell'area di Johannesburg-Pretoria in termini idrogeologici: tipologia di acquifero, rendimento, qualità delle acque, geochimica etc.

CARTA IDROGEOLOGICA DELL'AREA DI JOHANNESBURG



TIPOLOGIA DI ACQUIFERO	CLASSI DI RENDIMENTO (l/s)			
	0,1-0,5	0,5-2,0	2,0-5,0	>5,0
Fratturato	f1	f2	f3	—
Carsico	—	—	c3	c4
Intergranulare e fratturato	if1	if2	if3	—

Figura 10. Carta idrogeologica dell'area di Johannesburg.

Nella descrizione e caratterizzazione degli acquiferi si farà riferimento principalmente al lavoro di H. D Barnard (2000) riportato in bibliografia. Per quanto riguarda gli acquiferi *intergranulari* sono poco presenti sulla carta del foglio 2526 Johannesburg, e del tutto assenti nell'area oggetto di studio ovvero il duomo di Johannesburg. Passando invece agli acquiferi *fratturati*, nel caso di questo studio rivestono grande importanza, in quanto, grazie al Witwaterstrand Supergroup e alla Tranvaal Sequence bordano l'intero duomo (Agangi A. et al., 2015; Heinrich C. A., 2015; C. Philips G.N. et al., 2015; Akinbinu V. A., 2015; Bumby A. J. et al., 2012). Le dure rocce delle coperture sedimentarie che interessano gli acquiferi fratturati coprono quasi il 99% della mappa di Johannesburg. Queste rocce hanno approssimativamente un'età di 3000My subendo nella loro storia geologica varie intrusioni magmatiche e fasi metamorfiche. I principali processi deformativi sono stati causati dall'uplift continentale, dal weathering e dall'erosione (Barnard H. C., 2000). Le rocce appartenenti a questa categoria di acquifero sono principalmente composte da materiale arenaceo sottoposto ad un comportamento fragile, generando così numerose fratture che sviluppano una porosità secondaria all'interno della roccia dove l'acqua può infiltrarsi.

La prima formazione geologica appartenente a questo tipo di acquiferi che si andrà ad affrontare è il “*West Rand Group*” del “Witwaterstrand Supergroup”. Il suddetto Gruppo è composto da quarziti, shale ferruginosi e quarziti ad orizzonti di conglomerato con intrusioni di dicchi e sills. Quarziti e argilliti presentano

durezza molto differenti infatti, gli shale, molto meno resistenti, spesso sono stati erosi o si trovano alla base della serie lungo le valli o le depressioni, mentre le quarziti essendo molto più resistenti affiorano ancora in tutta la loro consistenza. Secondo “De villiers” (1961) dicchi e sills all’interno degli shale creerebbero delle discontinuità dove l’acqua riesce ad infiltrarsi ed alterare notevolmente gli shale al contatto con le intrusioni. Queste discontinuità, insieme a faglie e a fratture di varia consistenza, sono le perfette caratteristiche per la formazione di acquiferi fratturati. Gli acquiferi in questa Formazione, secondo la classificazione di Barnard (2000) hanno un rendimento medio, in quanto circa il 65% dei pozzi presenti producono meno di 2l/s (figura 11) ed il livello della tavola d’acqua si trova compreso tra una profondità di 10 e 25m sotto il piano campagna. La ricarica degli acquiferi del West Rand Group che deriva dalle precipitazioni secondo Barnard (1997) è stimata intorno al 6,5% delle precipitazioni annue. Dal punto di vista geochimico (figura12 e tabella 1), si hanno a disposizione dati riguardanti salinità conducibilità elettrica ed altri parametri riportati in tabella 1, i quali rendono l’acqua idonea per ogni utilizzo, dall’uso domestico all’industriale. Gli unici fattori che possono presentare una certa variabilità in funzione del pozzo di prelievo sono i cloruri e i solfati in quanto possono essere influenzati dall’attività mineraria.

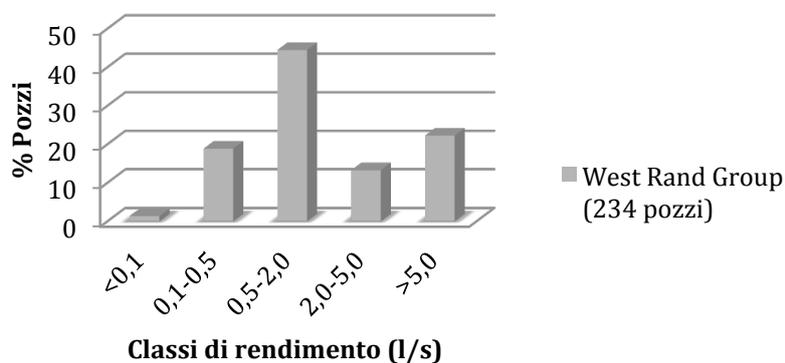


Figura 11. Rendimento dei pozzi nel West Rand Group (Barnard H.C., 2000).

Parameter	Minimum Value	Maximum Value	Mean Value
pH	5,3	8,4	7,2
Electrical Conductivity (mS/m)	2,6	256	37,3
Total Dissolved Salts (Mg/l)	21,3	1492	254
Calcium (mg/l Ca)	1	243	27
Magnesium (mg/l Mg)	1	132	18,9
Sodium (mg/l Na)	1	126	18,7
Potassium (mg/l K)	0,1	8,4	1,8
Chloride (mg/l Cl)	1	570	24,7
Sulphate (mg/l SO ₄)	1	202	16,1
Total Alkalinity (mg/l CaCO ₃)	8	346	117
Nitrate (mg/l N)	0,1	30,2	4,5
Fluoride (mg/l F)	0,1	1,7	0,3
Langelier Saturation Index (LSI)	-5	0,8	-1,2
Sodium Adsorption Ratio (SAR)	0,1	4,8	0,6

Tabella 1. Geochimica delle acque del West Rand Group. I dati sono relativi all'analisi di 81 pozzi (Barnard H.C., 2000).

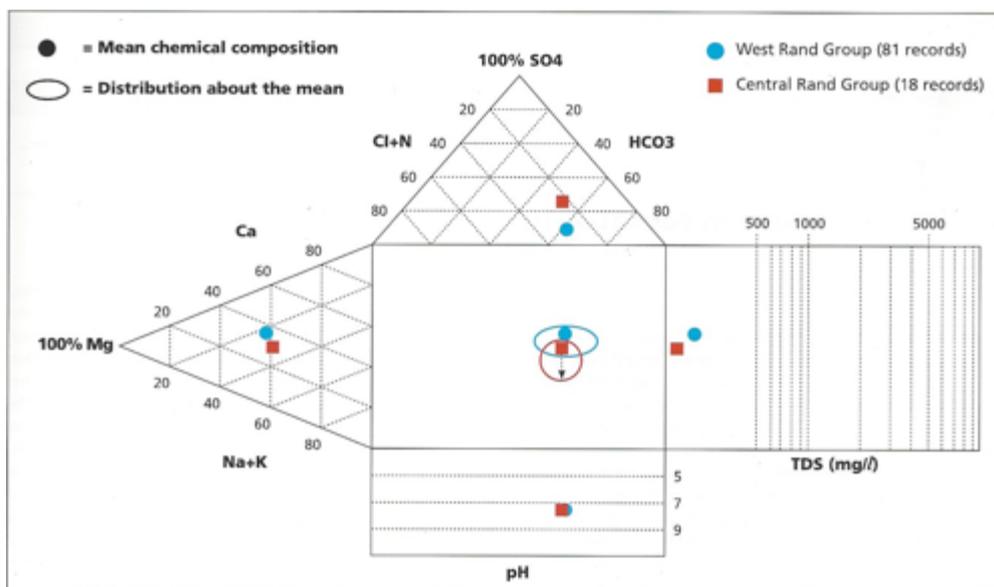


Figura 12. Chimica delle acque del West e Central Rand Group (Barnard H.C., 2000).

La seconda formazione presa in considerazione in questa tesi per descrivere gli acquiferi fratturati è il *Central Rand Group* del Witwaterstrand Supergroup. La Central Rand Group è composta principalmente da rocce arenitiche o ruditiche

che spesso si trovano molto alterate, che talvolta costituiscono fonte di ricarica per gli acquiferi. Le acque sotterranee presentano un rendimento medio basso, in quanto più dell'80% dei pozzi risultano avere una resa inferiore di 2l/s (figura 13). Solo in rari contesti geologici questa formazione può presentare rendimenti più elevati, un esempio è in corrispondenza della Sugar Bush Fault. La profondità della tavola d'acqua è simile a quella del West Rand Group, quindi compresa tra i 10 e i 25m. I dati geochimici (figura 14 e tabella 2) indicano che in termini di salinità, con un valore di EC di 29mS/s, l'acqua risulta essere idonea per tutti gli usi. I valori che talvolta risultano anomali sono potassio e solfati che anche in questo caso probabilmente sono legati all'attività mineraria.

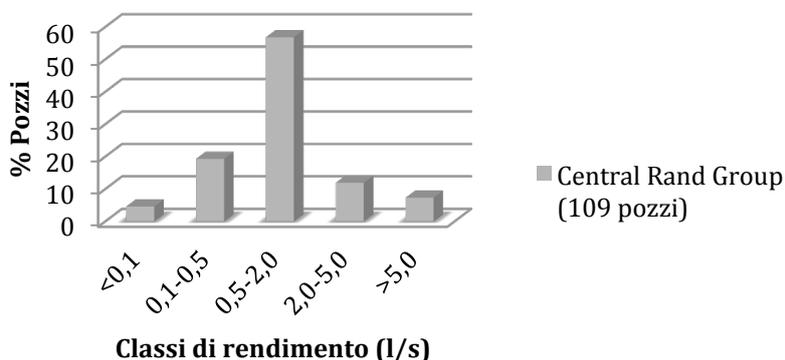


Figura 13. Rendimento dei pozzi nel West Rand Group (Barnard H.C., 2000).

Parameter	Minimum Value	Maximum Value	Mean Value
pH	6,9	10	7,3
Electrical Conductivity (mS/m)	3,9	115,6	29,3
Total Dissolved Salts (Mg/l)	14	611	207
Calcium (mg/l Ca)	1	100	17,6
Magnesium (mg/l Mg)	1	65	13,7
Sodium (mg/l Na)	2	84	20
Potassium (mg/l K)	0,1	33,8	2,6
Chloride (mg/l Cl)	1	113	17,9
Sulphate (mg/l SO ₄)	1	253	33,5
Total Alkalinity (mg/l CaCO ₃)	3	278	85
Nitrate (mg/l N)	0,1	14,7	2
Fluoride (mg/l F)	0,1	0,8	0,3
Langelier Saturation Index (LSI)	-5	0,7	-1,6
Sodium Adsorption Ratio (SAR)	0,1	10,8	1,2

Tabella 2. Geochimica delle acque del Central Rand Group. I dati sono relativi all'analisi di 18 pozzi (Barnard H.C., 2000).

Passando ora alla Transvaal Sequence, una delle formazioni di questa serie che interessa gli acquiferi fratturati dell'area oggetto di studio è la *Black Reef Formation*. Si tratta di una formazione dallo spessore molto sottile, appena 30m ed è composta da quarziti, lenti di conglomerati e shale al top. Per quanto riguarda le informazioni sugli acquiferi, purtroppo sono molto poche, probabilmente perché questi acquiferi non rivestono molta importanza in quanto circa il 73% dei pozzi ha un rendimento inferiore di 2l/s (figura 14).

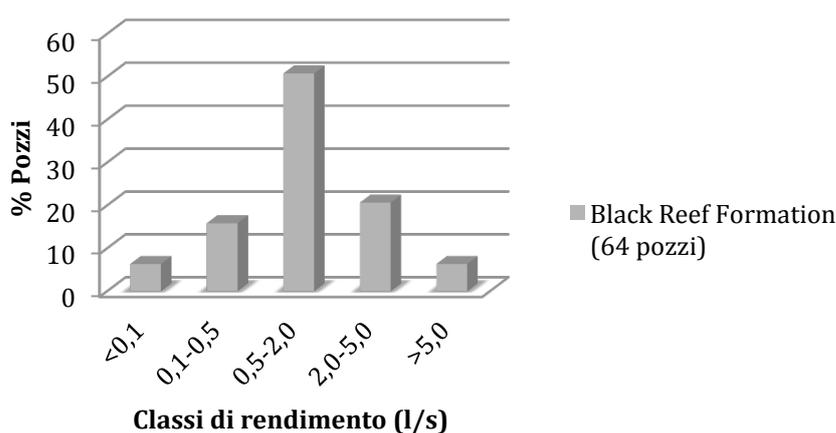


Figura 14. Rendimento dei pozzi nella Black Reef Formation (Barnard H.C., 2000).

La profondità della tavola d'acqua è estremamente variabile in quando è dipendente dalla direzione di movimento della falda verso la dolomia (Hobbs, 1998).

Vista la del tutto limitata estensione di questa formazione, e la difficoltà nel reperire dati, la qualità delle informazioni sulla geochimica di queste acque, risultano essere compromesse, tuttavia, come per le altre formazioni affrontate i dati geochimici indicano che la qualità delle acque in termini di salinità, con un calore di EC di 34mS/s (figura 15 e tabella 3), è generalmente adatta per tutti gli usi. I valori anomali sono dati dai solfati ma questo è giustificato dall'attività mineraria.

Parameter	Minimum Value	Maximum Value	Mean Value
pH	4,8	8,3	7
Electrical Conductivity (mS/m)	2,1	139	34,3
Total Dissolved Salts (Mg/l)	21	1034	238
Calcium (mg/l Ca)	1	109	28
Magnesium (mg/l Mg)	1	103	18
Sodium (mg/l Na)	1	93	14
Potassium (mg/l K)	0,2	11,7	1,7
Chloride (mg/l Cl)	1	90	15
Sulphate (mg/l SO ₄)	1	557	36
Total Alkalinity (mg/l CaCO ₃)	6	521	98
Nitrate (mg/l N)	0,1	20,1	2,8
Fluoride (mg/l F)	0,1	0,7	0,2
Langelier Saturation Index (LSI)	-5,1	0,6	-1,8
Sodium Adsorption Ratio (SAR)	0,1	2,1	0,5

Tabella 3. Geochimica delle acque della Black Reef Formation. I dati sono relativi all'analisi di 52 pozzi (Barnard H.C., 2000).

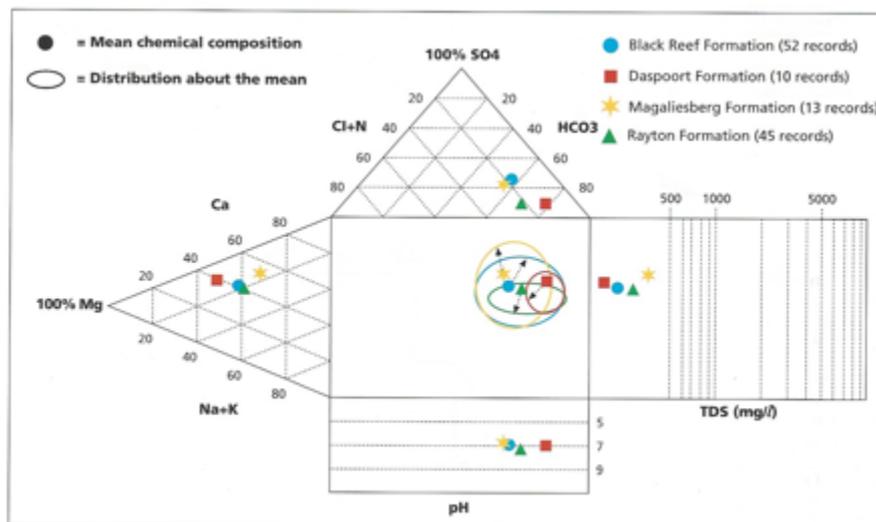


Figura 15. Chimica delle acque della Black Reef Formation, Magaliesberg, Daspoort Formation e Rayton Formations (Barnard H.C., 2000).

Un'altra formazione del Transvaal Supergroup appartamente alla categoria di acquiferi fratturati è la *Daspoort Formation*. Questa formazione è composta da quarziti con livelli di shale e siltstone e, visto il carattere fragile delle quarziti, la Daspoort Formation risulta molto fratturata da faglie e joints che permettono l'infiltrazione di acqua nella roccia e la formazione di acquiferi. La profondità

della tavola d'acqua è generalmente compresa tra 10 e 30m sotto il piano campagna.

Dal punto di vista geochimico, queste acque presentano un valore medio di conducibilità elettrica di 26mS/m (figura 15 e tabella 4), e questo indica che generalmente esse sono adatte per tutti gli usi.

Parameter	Minimum Value	Maximum Value	Mean Value
pH	5,8	8,1	7,1
Electrical Conductivity (mS/m)	3,8	64	26
Total Dissolved Salts (Mg/l)	29	442	195
Calcium (mg/l Ca)	2	59	19,7
Magnesium (mg/l Mg)	1	39	16,6
Sodium (mg/l Na)	2	15	5,4
Potassium (mg/l K)	0,3	3,2	1,3
Chloride (mg/l Cl)	2	59	8,9
Sulphate (mg/l SO ₄)	1	13	4,9
Total Alkalinity (mg/l CaCO ₃)	15	275	112
Nitrate (mg/l N)	0,4	5,8	1,8
Fluoride (mg/l F)	0,1	0,5	0,2
Langelier Saturation Index (LSI)	-4,3	0,3	-1,7
Sodium Adsorption Ratio (SAR)	0,1	0,6	0,3

Tabella 4. Geochimica delle acque della Daspoort Formation. I dati sono relativi all'analisi di 10 pozzi (Barnard H.C., 2000).

L'ultima formazione del Tranvaal Supergroup che si andrà a descrivere in questa tesi è la *Magaliesberg Formation*. Si tratta di quarziti dallo spessore estremamente variabile, da 15 a 300m nella zona vicino a Pretoria. Secondo Kok (1993a) gli acquiferi in questa formazione sono associati a fratture, a zone di shear e a zone di contratto con i sills.

Il rendimento di questi acquiferi in accordo con H.C Barnard, è classificato come basso in quanto il 76% dei pozzi produce meno di 2l/s (figura 16), e la tavola d'acqua si trova solitamente tra 10 e 40m sotto al piano campagna. I dati geochimici rivelano che con una conducibilità elettrica di 48mS/s (figura 15 e tabella 5) queste acque risultano avere una buona qualità, che le rende idonee per tutti gli usi.

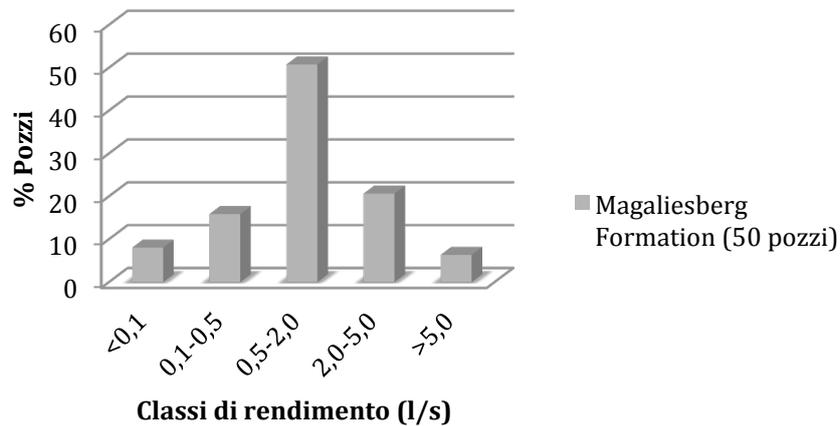


Figura 16. Rendimento dei pozzi nella Magaliesberg Formation (Barnard H.C., 2000).

Parameter	Minimum Value	Maximum Value	Mean Value
pH	5,6	8,5	6,9
Electrical Conductivity (mS/m)	1,6	120	48
Total Dissolved Salts (Mg/l)	13	1107	318
Calcium (mg/l Ca)	1	257	56
Magnesium (mg/l Mg)	1	51	22
Sodium (mg/l Na)	1	97	18,9
Potassium (mg/l K)	0,3	10,2	2,7
Chloride (mg/l Cl)	1	90	17
Sulphate (mg/l SO ₄)	1	536	54
Total Alkalinity (mg/l CaCO ₃)	3	319	165
Nitrate (mg/l N)	0,1	83,4	11,3
Fluoride (mg/l F)	0,1	0,3	0,2
Langelier Saturation Index (LSI)	-9,4	1	-1,5
Sodium Adsorption Ratio (SAR)	0,1	2,3	0,5

Tabella 5. Geochimica delle acque della Magaliesberg Formation. I dati sono relativi all'analisi di 13 pozzi (Barnard H.C., 2000).

La terza tipologia di acquiferi del Sudafrica, ovvero quelli *carsici*, rivestono una rilevante importanza per gli scopi di questa tesi, in quanto in particolar modo nella zona di Johannesburg risultano offrire grandi quantità d'acqua. Nell'area del duomo di Johannesburg, i suddetti acquiferi sono rappresentati dal *Chuniespoort Group*. Gli acquiferi del Chuniespoort Group costituiscono importanti fonti

d'acqua in Sudafrica, e questo è dovuto al fatto che rocce come la dolomia hanno un'alta capacità di immagazzinamento di acqua a causa delle grandi cavità carsiche che contengono. Vista la loro grande valenza per lo sviluppo del Paese sono stati molti gli autori a studiare questi acquiferi (Barnard, 1997), (Bredenkamp et al., 1986), (Bredenkamp, 1995), (Enslin and Kriel, 1967), (Hobbs, 1988), (Kafri et al, 1985), (Kok, 1985), (Kuhn, 1986, 1989), (Polivka, 1987). Le cavità carsiche nella sono dovute al fatto che l'acqua piovana contiene acido carbonico (H₂CO₃) e questa, percolando nella roccia attraverso piani di debolezza come faglie, fratture o joints dissolve la dolomia attraverso la seguente reazione chimica:



dolomite + acido carbonico → bicarbonato di calcio + bicarbonato di magnesio

La solubilità del carbonato e il trasporto in soluzione di questo sono estremamente importanti per lo sviluppo di cavità carsiche e caverne. Il processo chimico sopra descritto è chiaramente riferito al fenomeno della carsificazione che, nell'area di Johannesburg è ben visibile nel sito geo-archeologico di Cradle of Humankind. Oltre a grotte e caverne, un importante e molto diffuso fenomeno carsico è rappresentato dalle doline. È facilmente intuibile che nelle formazioni a dolomia siano molto sviluppate grotte, caverne o cavità varie che costituiscono un ottimo punto di raccolta per grandi quantità d'acqua formando così i suddetti acquiferi. Secondo gli studi di Enslin e Kriel (1967) la capacità di accumulo d'acqua (storage capacity) della dolomite, diminuisce con la profondità e questo è dimostrato dal fatto che lo storage capacity a 61m di profondità è del 9,1% mentre a 146m si abbassa all'1,3%, tuttavia, generalmente varia dall'1 e il 5 %. La continuità degli acquiferi dolomitici è interrotta da strutture geologiche poste in posizione verticale o sub-verticale come dicchi intrusivi. Questi sono poco permeabili o addirittura impermeabili e quindi costituiscono una barriera per il

movimento delle acque sotterranee realizzando così una compartimentazione degli acquiferi dolomitici. Il contatto dicco-dolomia, talvolta genera un piano di debolezza che facilita la risalita in superficie dell'acqua sotterranea. Il monitoraggio delle aree dolomitiche in funzione dell'estrazione di acqua è importantissimo in quanto, l'estrazione di acqua spesso può provocare situazioni di subsidenza, talvolta molto pericolose. Lo sviluppo di doline o subsidenza in genere avviene principalmente per emungimenti di pozzi che interessano acquiferi posti a profondità inferiori ai 30m. In genere questi acquiferi carsici, secondo la classificazione di H.C Barnard (2000), sono ritenuti ad alto rendimento, visto che circa il 50% dei pozzi rende più di 5l/s con un massimo di 126l/s (figura 17).

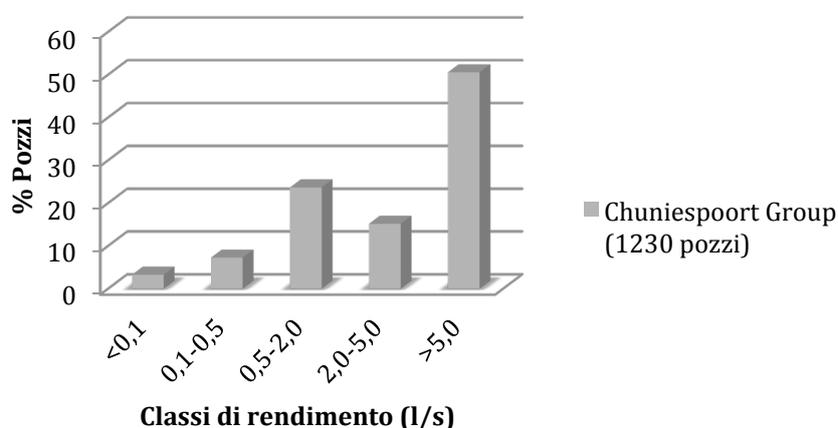


Figura 17. Rendimento dei pozzi per il Chuniespoort Group (Barnard H.C., 2000).

Diversamente a molte altre formazioni geologiche, la tavola d'acqua in acquiferi dolomitici non segue il rilievo topografico, infatti spesso si presenta come una superficie quasi orizzontale con un basso gradiente idraulico. Per questa caratteristica si possono avere aree di rilievo con la falda più profonda, anche sotto i 100m. Un'indicazione sulla ricarica degli acquiferi dolomitici a causa delle piogge è data dallo studio di Bredenkamp et al (1995) riportato in figura 18, nella quale viene indicato un massimo valore di ricarica del 9% annuo con precipitazioni di 800mm; in particolari casi però è stato anche trovato un valore di ricarica del 13,9%.

I valori geochimici di queste acque sono riportati in figura 19 e tabella 6 e risultano avere un EC di 63mS/s con un pH di circa 7,6 indicando che la qualità dell'acqua è generalmente accettabile per molto gli usi, ma visti i valori di cloruri, solfati e nitrati estremamente variabili, bisogna fare ben attenzione prima reputare l'acqua idonea ad usi potabili.

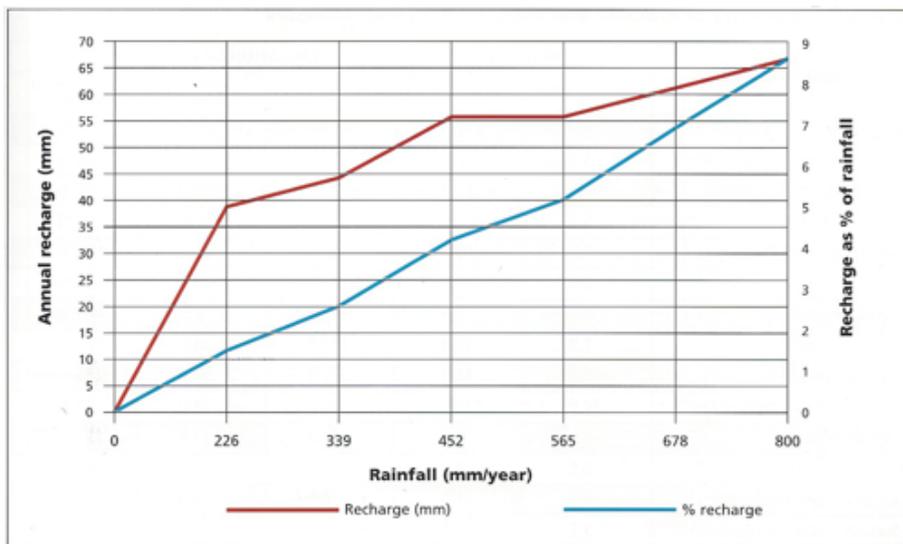


Figura 18. Il grafico mostra la ricarica degli acquiferi dolomitici in funzione della quantità delle piogge cadute durante l'anno (Bredenkamp et al., 1995).

Parameter	Minimum Value	Maximum Value	Mean Value
pH	5,8	9,5	7,6
Electrical Conductivity (mS/m)	4,4	397	62,9
Total Dissolved Salts (Mg/l)	43,1	3402	443,6
Calcium (mg/l Ca)	1	436	52,7
Magnesium (mg/l Mg)	1	223	35,4
Sodium (mg/l Na)	1	299	24,1
Potassium (mg/l K)	0,1	39	2,3
Chloride (mg/l Cl)	1	900	37,7
Sulphate (mg/l SO ₄)	1	2172	70,5
Total Alkalinity (mg/l CaCO ₃)	8	664	177,3
Nitrate (mg/l N)	0,1	122	5,6
Fluoride (mg/l F)	0,1	2,8	0,3
Langelier Saturation Index (LSI)	-4,7	3	-0,4
Sodium Adsorption Ratio (SAR)	0,03	2,9	0,5

Tabella 6. Geochimica delle acque per il Chuniespoort Group. I dati sono relativi all'analisi di 223 campioni (Barnard H.C., 2000).

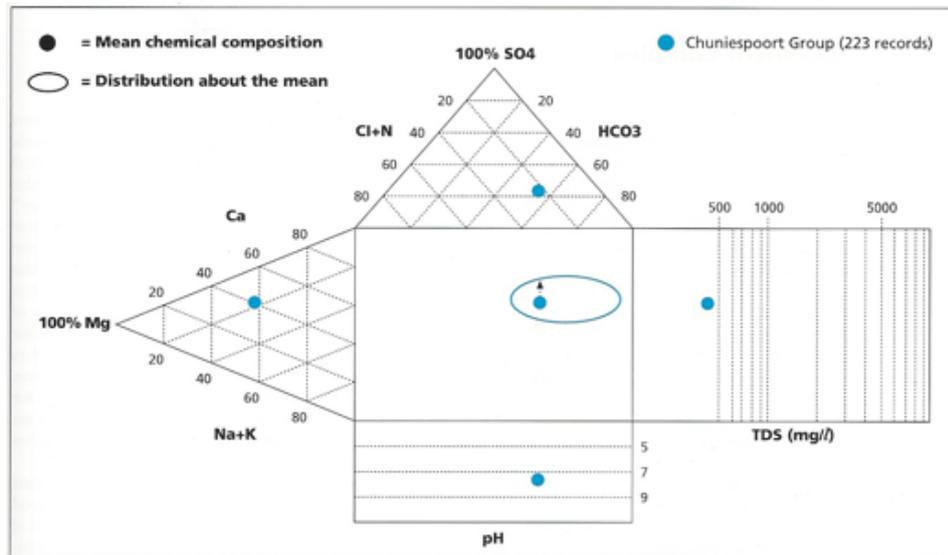


Figura 19. Chimica delle acque del Chuniespoort Group (Barnard H.C., 2000).

Come quarta ed ultima categoria di acquiferi ci sono gli acquiferi *intergranulari e fratturati*.

La formazione per eccellenza che, nella zona di Johannesburg, appartiene alla suddetta categoria, è il *Basement Complex*. Le acque di questi acquiferi sono generalmente associate a zone di alterazione, brecce o joints, tuttavia le si possono trovare sia in materiali alterati saturi, sia al contatto con i graniti non alterati. La maggior parte delle zone di faglia e joints creano strutture che tendono a ridursi fino a scomparire in profondità con una corrispondente diminuzione della permeabilità, la quale in queste rocce è inferiore dell'1%. Il rendimento degli acquiferi nel Basement Complex è classificato come medio buono (Barnard H.C., 2000), in quanto circa il 62% dei pozzi ha una resa superiore a 2l/s (figura 20). La profondità della tavola d'acqua generalmente è tra i 5m e i 30m sotto il piano campagna, ma le acque possono penetrare più in profondità a seconda della tipologia ed estensione delle fratture nella roccia. La parte superficiale di questa formazione è solitamente materiale sciolto costituito da granito molto alterato e questo, chiaramente è molto permeabile e in alcune situazioni genera delle sorgenti naturali di acqua. Come descritto anche negli acquiferi carsici questo effetto lo si trova spesso in corrispondenza di dicchi

impermeabili, i quali creano delle barriere per l'acqua e la fanno risalire in superficie.

In figura 21 e tabella 7 sono riportati i dati relativi alla qualità delle acque la quale risulta molto buona presentando un EC di 38mS/s e un pH medio di 7,5. I valori che in qualche analisi sono risultati anomali sono relativi ai cloruri e ai solfati, come per gli altri acquiferi sono giustificati dall'intensa attività mineraria della zona.

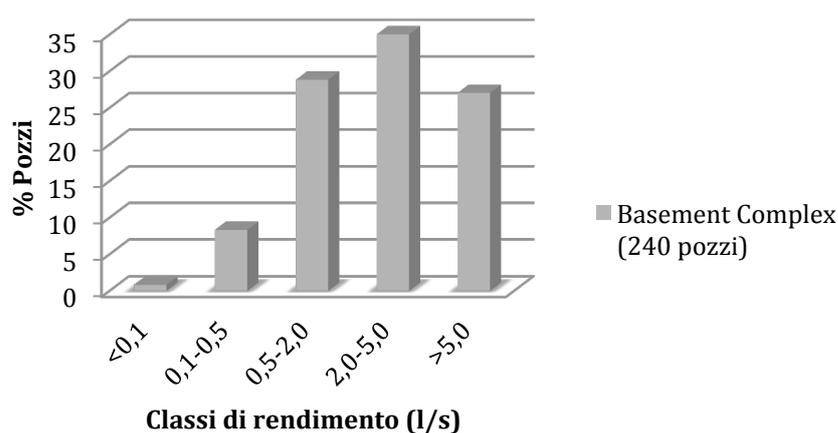


Figura 20. Rendimento dei pozzi per il Basement Complex (Barnard H.C., 2000).

Parameter	Minimum Value	Maximum Value	Mean Value
pH	6,7	8,4	7,5
Electrical Conductivity (mS/m)	8,6	180	38
Total Dissolved Salts (Mg/l)	67	1170	263
Calcium (mg/l Ca)	5	155	29
Magnesium (mg/l Mg)	2	48	16
Sodium (mg/l Na)	2	172	23
Potassium (mg/l K)	0,4	18,1	2,4
Chloride (mg/l Cl)	1	274	18,5
Sulphate (mg/l SO ₄)	1	202	18,4
Total Alkalinity (mg/l CaCO ₃)	24	284	122
Nitrate (mg/l N)	0,1	47	6,5
Fluoride (mg/l F)	0,1	1,7	0,3
Langelier Saturation Index (LSI)	-2,7	0,5	-1
Sodium Adsorption Ratio (SAR)	0,1	3,2	0,9

Tabella 7. Geochimica delle acque per il Basement Complex. I dati sono relativi all'analisi di 62 campioni (Barnard H.C., 2000).

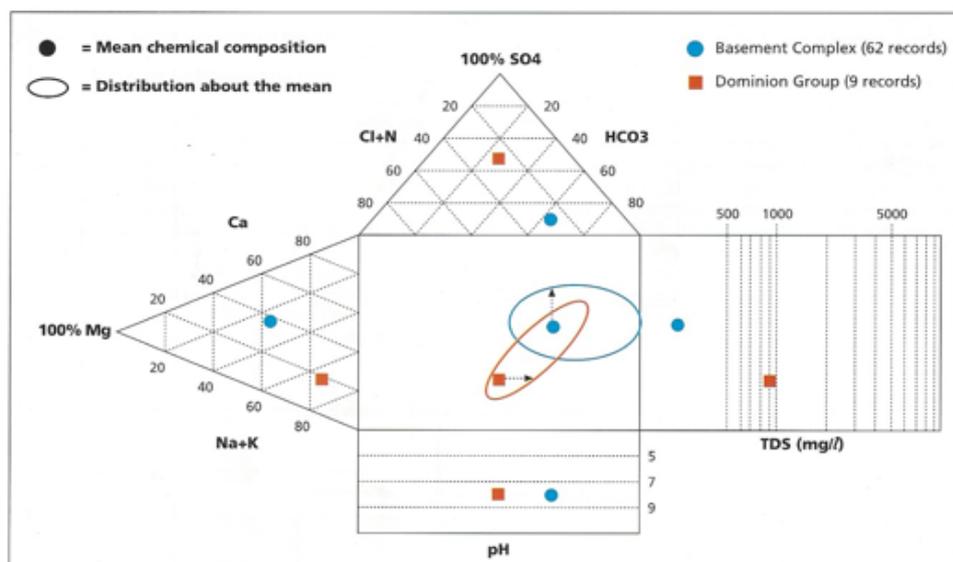


Figura 21. Chimica delle acque del Basement Complex (Barnard H.C., 2000).

La seconda formazione che è interessata dagli acquiferi intergranulari e fratturati è la *Timeball Hill* della Transvaal Sequence ed è composta da strati di quarzite alternati a shales. Le falde in shales e quarziti sono differenti, in quanto gli shales sono molto alterabili e quindi costituiscono acquiferi prevalentemente intergranulari, mentre le quarziti sono difficilmente alterabili ed ospitano acquiferi in fratture o joints, dunque di tipo fratturato.

Il rendimento degli acquiferi di questa formazione secondo Barnard (2000) è classificato basso considerando che circa il 70% dei pozzi hanno una resa inferiore di 2l/s (figura 22). La tavola d'acqua si trova tra i 5 e i 40m sotto il piano campagna.

Queste acque presentano un EC di 34mS/s e un valore medio del pH di 7,2 (figura 23 e tabella 8), indicando che la qualità dell'acqua è eccellente e generalmente adatta a molti usi. Come per quasi tutti gli altri acquiferi, a causa di un'intensa attività mineraria gli elementi che presentano un alto coefficiente di variazione sono sodio, cloruri, solfati e nitrati, ciò significa che è necessario fare particolare attenzione prima di utilizzare queste acque per uso domestico-potabile.

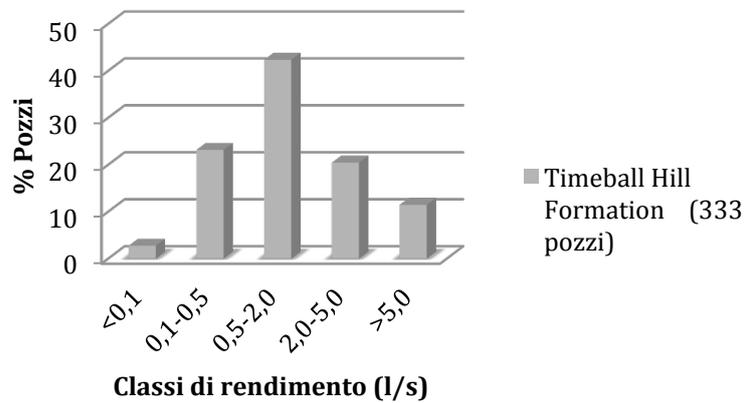


Figura 22. Rendimento dei pozzi della Timeball Hill (Barnard H.C., 2000).

Parameter	Minimum Value	Maximum Value	Mean Value
pH	4	8,7	7,2
Electrical Conductivity (mS/m)	1,6	283	34
Total Dissolved Salts (Mg/l)	15,5	2224	278
Calcium (mg/l Ca)	1	333	29
Magnesium (mg/l Mg)	1	139	19
Sodium (mg/l Na)	1	186	15
Potassium (mg/l K)	0,1	20,6	1,6
Chloride (mg/l Cl)	1	190	15
Sulphate (mg/l SO ₄)	1	1214	26
Total Alkalinity (mg/l CaCO ₃)	1	390	125
Nitrate (mg/l N)	0,1	39	2,9
Fluoride (mg/l F)	0,1	3,1	0,3
Langlier Saturation Index (LSI)	-7,2	1	-1,5
Sodium Adsorption Ratio (SAR)	0,1	8,7	0,6

Tabella 8. Geochimica delle acque Timeball Hill. I dati sono relativi all'analisi di 81 campioni (Barnard H.C., 2000).

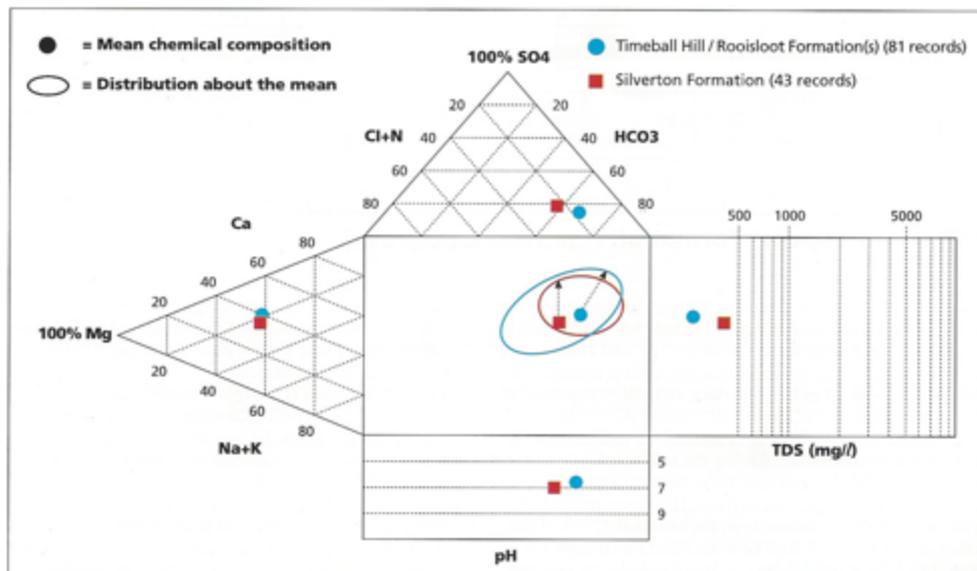


Figura 23. Chimica delle acque del Basement Complex e della Silverton Formation (Barnard H.C., 2000).

Un'altra formazione interessata da acquiferi di questa categoria è la *Silverton Formation* della Transvaal Sequence, costituita dal punto di vista litologico principalmente da shale. Gli acquiferi sono collocati in corrispondenza di zone di alterazione, in brecce, in zone fratturate e al contatto tra shale e dicchi. Secondo la classificazione di Barnard (2000) questi acquiferi presentano per un 40% un rendimento maggiore di 2l/s mentre il 22% maggiore di 5l/s (figura 24) e la tavola d'acqua è posta ad una profondità compresa tra i 5m e i 25m. Generalmente le acque di questi acquiferi sono idonee per molti usi in quanto presentano un EC di 58mS/s e un pH medio di 7,6 (figura 24 e tabella 9); infine, come per gli altri acquiferi hanno risentito dell'attività mineraria che si manifesta in valori anomali di cloruri e solfati.

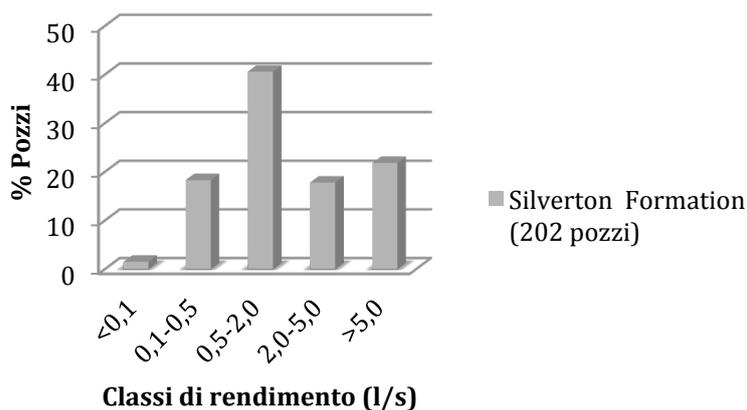


Figura 24. Rendimento dei pozzi della Silverton Formation (Barnard H.C., 2000).

Parameter	Minimum Value	Maximum Value	Mean Value
pH	5,5	8,8	7,6
Electrical Conductivity (mS/m)	5,6	340	58
Total Dissolved Salts (Mg/l)	39	2118	428
Calcium (mg/l Ca)	2	304	44
Magnesium (mg/l Mg)	2	148	32
Sodium (mg/l Na)	2	200	30
Potassium (mg/l K)	0,2	28	2,8
Chloride (mg/l Cl)	1	824	39
Sulphate (mg/l SO ₄)	1	953	56
Total Alkalinity (mg/l CaCO ₃)	14	480	181
Nitrate (mg/l N)	0,1	39	3,9
Fluoride (mg/l F)	0,1	3,1	0,3
Langelier Saturation Index (LSI)	-4,7	0,9	-0,6
Sodium Adsorption Ratio (SAR)	0,1	8,1	0,9

Tabella 9. Geochimica delle acque della Silverton Formation. I dati sono relativi all'analisi di 43 campioni (Barnard H.C., 2000).

L'ultima formazione geologica che ospita acquiferi intergranulari e fratturati nella zona d'interesse è la *Hekpoort Formation*. Questa formazione è composta essenzialmente da lava andesitica che spesso si trova alterata in materiali argillosi e può estendersi dai 10 ai 30m in profondità assumendo una permeabilità davvero bassa (Kok, 1993). Come per le altre formazioni geologiche che ospitano

acquiferi intergranulari e fratturati, anche nella Hekpoort Formation ci sono acquiferi intergranulari nelle zone di alterazione della roccia e acquiferi fratturati lungo fratture o joints nella lava andesitica ben preservata. Il rendimento dei pozzi è classificato come moderato (H.C. Barnard, 2000), in quanto il 37,5% dei pozzi produce tra 2 e 5 l/s (figura 25). La falda solitamente si trova ad una profondità compresa tra i 5 e i 30 m dal piano campagna, contenendo acque dalla qualità generalmente idonea a molti usi in quanto presenta un EC di 52mS/s e un pH di 7,5 (figura 26 e tabella 10) e, come gli acquiferi delle altre formazioni, anche questo ha risentito dell'attività mineraria, manifestata dai valori anomali di cloruri, sodio e solfati.

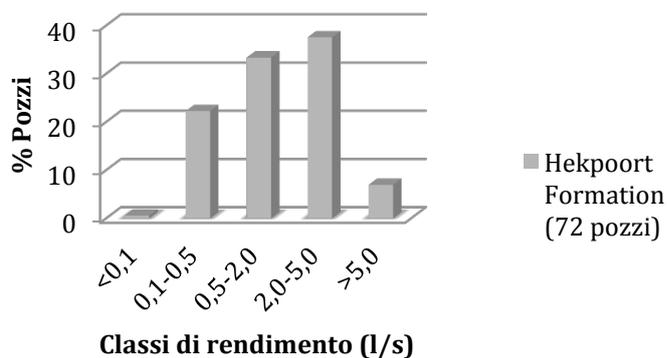


Figura 25. Rendimento dei pozzi delle Hekpoort Formation (Barnard H.C., 2000).

Parameter	Minimum Value	Maximum Value	Mean Value
pH	5,7	8,5	7,5
Electrical Conductivity (mS/m)	3,5	382	52
Total Dissolved Salts (Mg/l)	21	2988	398
Calcium (mg/l Ca)	2	139	44
Magnesium (mg/l Mg)	1	172	26
Sodium (mg/l Na)	1	330	30
Potassium (mg/l K)	0,2	17,2	2
Chloride (mg/l Cl)	1	227	23,5
Sulphate (mg/l SO ₄)	1	1600	79
Total Alkalinity (mg/l CaCO ₃)	0,8	516	156
Nitrate (mg/l N)	0,1	22,2	3,5
Fluoride (mg/l F)	0,1	3,1	0,3
Langelier Saturation Index (LSI)	-3,7	1	-0,8
Sodium Adsorption Ratio (SAR)	0,1	23	1,2

Tabella 10. Geochimica delle acque della Hekpoort Formation (Barnard H.C., 2000).

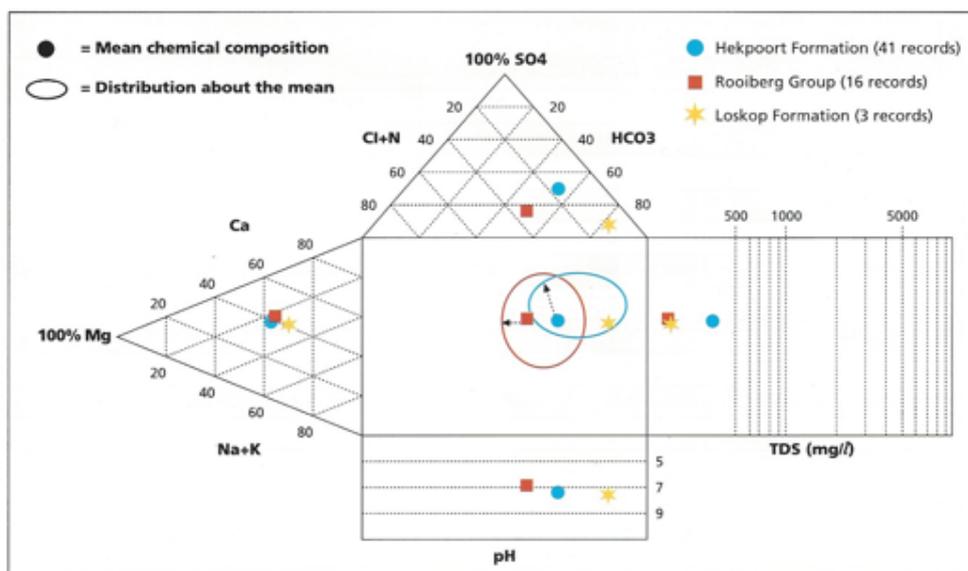


Figura 26. Chimica delle acque della Hekpoort Formation (Barnard H.C., 2000).

3.1.2 Clima

Dal punto di vista climatico, l'area oggetto di studio si trova a latitudini subtropicali dove generalmente è presente un ambiente arido o semi-arido con un clima secco e continentale, caratterizzato da un inverno rigido e secco ed un'estate calda, secca ma piovosa (Goldreich Y., 1992). Trovandosi nell'emisfero australe, la stagione calda, ovvero l'estate australe, si imposta per un periodo che va da circa settembre-ottobre fino a marzo-aprile. In questa stagione le temperature medie sono superiori ai 20°C, con la possibilità di raggiungere picchi anche di 40°C, solitamente a gennaio, il mese più caldo. È proprio in questo periodo che cade circa il 90% dei 700mm medi annui di piogge (figura 28). La stagione fredda invece, ovvero l'inverno australe, inizia intorno ad aprile e prosegue fino a settembre caratterizzata da un clima estremamente secco e da temperature rigide che possono addirittura arrivare sotto lo zero nel mese di luglio. I mesi più freddi sono giugno e luglio dove le temperature medie sono intorno ai 10 gradi ma con picchi molto minori.

Come sopra scritto le piogge medie annue risultano intorno ai 700mm/anno, con un massimo di 1100mm raggiunti nel 2002 e un minimo di 200mm nel 1990. In questa zona, il contributo delle piogge portate nel Paese da correnti provenienti dall'Oceano Indiano, è fondamentale per la ricarica degli acquiferi, abbondantemente sfruttati per svariati usi come descritto nel paragrafo precedente.

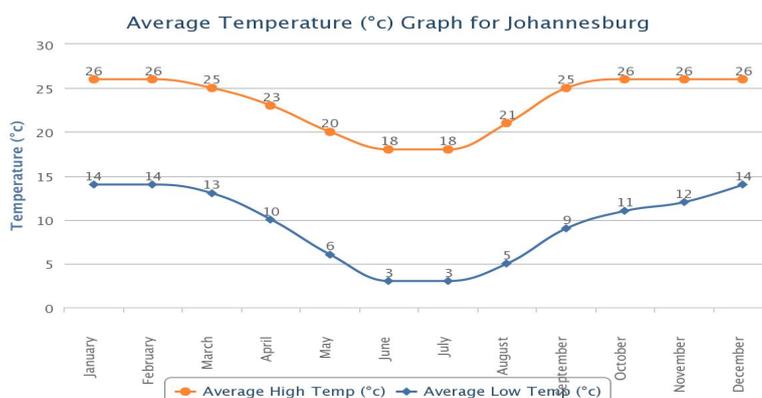


Figura 27. Distribuzione mensile delle temperature medie massime e minime per l'area di Johannesburg. Il grafico è stato realizzato utilizzando dati raccolti tra il 2000 e 2012 (Worldweatheronline).

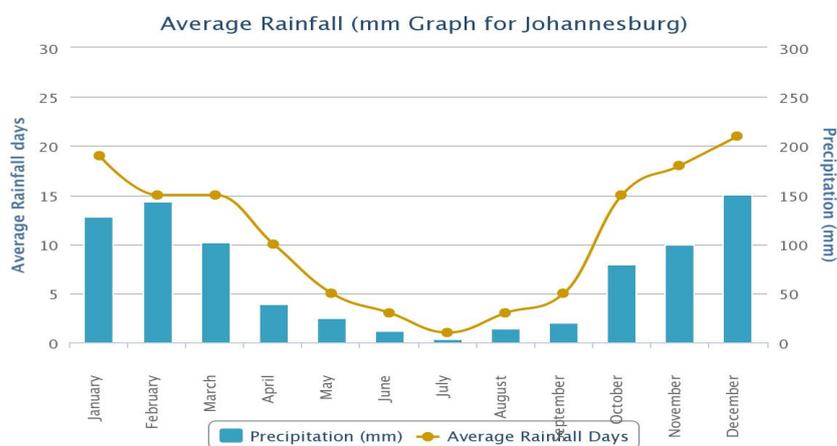


Figura 28. Distribuzione mensile del numero di giorni e dei mm di pioggia nell'area di Johannesburg. Il grafico è stato realizzato utilizzando dati raccolti tra il 2000 e 2012 (Worldweatheronline).

3.2 Durban

3.2.1 Geologia e acquiferi

Durban, come è visibile dalla figura si trova lungo la costa indiana del sudafrica. La struttura geologica della zona litoranea, ovvero l'area oggetto di questo studio, è costituita da una serie di coperture sedimentarie tiltate verso l'oceano, sovrapposte da sedimenti sciolti di età quaternaria in prossimità della costa. La geologia che si andrà a descrivere si basa sulle pubblicazioni e mappe del comitato sudafricano per la stratigrafia (S.A. Committee for Stratigraphy) e che sono state utilizzate per redare la mappa idrogeologica della zona di Durban da parte di King G.M. (2002) e rivisitata in questo lavoro di tesi (figura 30). Grazie ai lavori sopra citati, in questa tesi si presenteranno le varie formazioni geologiche con i relativi acquiferi e le caratteristiche idrogeologiche di questi. Come indica la carta geologica (figura 29) nell'area di Durban le formazioni geologiche sono state suddivise come in seguito riportato: Natal Metamorphic Province, Natal Group, Misikaba Formation, Karoo Supergroup, di cui fanno parte il Dwyka Group, Ecca Group, Beaufort Group, Clarens Formation, Elliot Formation, Molteno Formation, Karoo Dolerite e Drakensberg Group e infine ci sono i sedimenti Quaternari come Alluvium, Coastal sediments (Maputernary Group).

L'area della carta geologica e idrogeologica è molto ampia e si estende ben oltre l'area di studio, quindi, in questa tesi ci si limiterà a descrivere solo le formazioni geologiche e gli acquiferi d'interesse per la caratterizzazione del sottosuolo allo scambio termico nella zona urbana di Durban.

L'area costiera e l'interno costa della regione di KwaZulu-Natal costituisce una porzione di rift del margine continentale e, come tale, questa zona è fortemente fagliata ed interessata da un'antica tettonica (Dingle R. V. et al., 1974) che ha spezzettato l'intera area in horst e graben, molti blocchi (zona di Durban) infatti risultano tiltati in direzione del mare con un angolo compreso tra 5 e 12°. Le faglie di quest'area seguono due trend direzionali differenti, uno sud-nord e uno sudovest-nordest e sono tutte di Età giurassica superiore, legate alla

frammentazione di Gondwana (Dingle R. V. et al., 1974), quindi di natura estensionale o normale.

Attorno a 1Gy di anni fa la subduzione e collisione lungo il margine meridionale del Kaapvaal Craton hanno prodotto le rocce del *Natal Metamorphic Province* (Spencer C. J. et al., 2014; Lindeque A. et al., 2011; Clarke B. M., 2008). Dal punto di vista strutturale si tratta di una provincia metamorfica molto compressa, in quanto sono presenti molte pieghe, faglie, e varie intrusioni magmatiche. Molte delle rocce che fanno parte di questa unità tendono ad essere fortemente foliate (Mendonidis P. et al., 2014), con abbondanti joints prevalentemente in direzione Est-Ovest. La Natal Metamorphic Province è suddivisa in molte sotto-unità che litologicamente sono prevalentemente composte da graniti, gneiss, quarziti con qualche porzione di calcari e conglomerati.

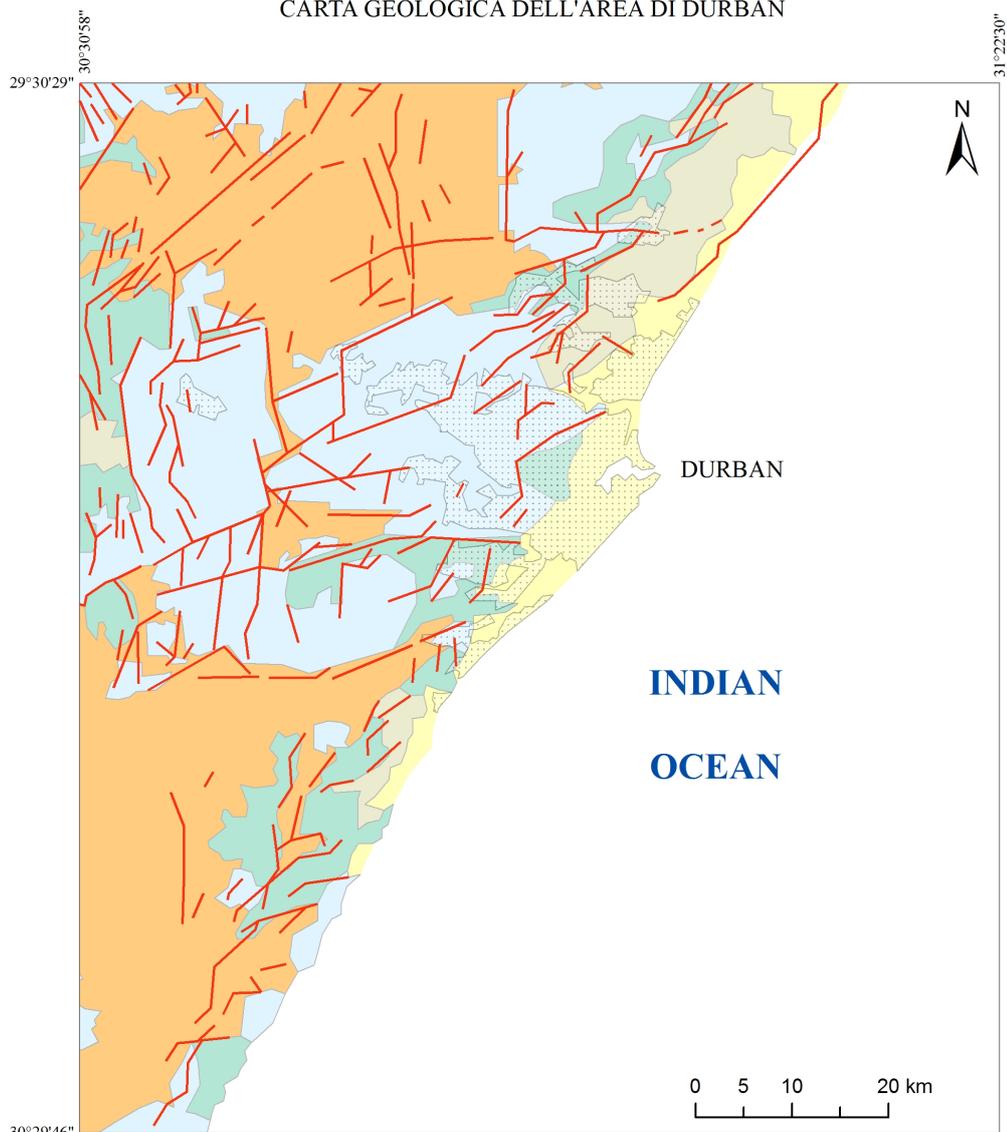
La seconda formazione d'interesse è la *Natal Group* che rappresenta la prima copertura sedimentaria imposta sul nuovo basamento ed ha età di circa 490My (Marshall C. G. A. et al., 1999). Il Natal Group è composto prevalentemente da sandstones arcocici e quarziti con sporadici livelli di shales. Lo spessore di questa formazione può arrivare a 600m, e da recenti studi è stato suddiviso in due sotto unità; una tiene il nome di Natal Group e l'altra che è stata nominata *Misikaba Formation* (Marshall C. G. A. et al., 1999) che da studi isotopici risulta leggermente più giovane e affiora proprio nella zona urbana di Durban, ovvero l'area oggetto di studio.

Il *Dwyka Group*, come l'Ecce Group, fanno parte del Karoo Supergroup, si imposta sopra il Natal Group durante la glaciazione del Permo-Carbonifero ed è principalmente composta da tilliti scure con abbondanti inclusioni (Dunlevey J. N. et al., 2011). Il Dwyka Group è la più vecchia formazione del bacino del Karoo Supergroup, che si estendeva nel Sud della Gondwana e contiene circa 120My di storia geologica. Le rocce che compongono questa formazione vecchia 300My mostrano ancora i segni della glaciazione in quanto, gli affioramenti spesso mantengono strie e solchi dettate dal movimento dei ghiacciai. Il colore di queste tilliti, a causa dell'alterazione, lungo la storia è cambiato profondamente, passando da marrone scuro a marrone giallastro.

L'Ecce Group contiene tre formazioni, due molto simili e una di differente litologia. Le due formazioni simili sono la Pietermaritzburg e la Volksrust Formations e si tratta di argilliti e silt (Bell F. G. et al., 2000; Tavener-Smith R., 1980) depositi in mare nel Karoo Basins, che oggi occupano uno spessore che varia dai 250 ai 400m. Queste rocce sono di colore scuro, presentando una forte laminazione di shale e argilliti spesso molto sono alterati, con intercalazioni di arenarie a grana molto fine. La formazione differente è la Vryheid Formation posta stratigraficamente in mezzo alle altre due. Si tratta di arenarie contenenti fossili di piante, fagliati nella zona Nord di Durban e talvolta presentano livelli micacei di alterazione.

L'ultima e più giovane formazione dell'area oggetto di studio è il *Maputaland Group* di età Cenozoica. Si tratta di dune costiere a forte componente calcarea di origine eolica e con uno spessore che può arrivare a 150m. Talvolta i più vecchi sedimenti di questo Gruppo si possono trovare calcificati e cementati creando un vero e proprio sedimento consolidato. Uno dei prodotti di alterazione più antico di questi sedimenti è conosciuto con il nome di "Berea-Type red sand", mentre alterazioni più recenti hanno creato dune contenenti ilmenite, rutilo e zirconi.

CARTA GEOLOGICA DELL'AREA DI DURBAN



LITOLOGIE

- Maputaland Group (Quaternario)**
 Sedimenti prevalentemente non consolidati come sabbia, argilla e silt.

- Ecca Group (Permiano)**
 Questo Gruppo è suddiviso in una parte argillitica (Pietermaritzburg e Volksrust Formations) e una parte arenacea rappresentata dalla Vryheid Formations.

- Dwyka Group (Carbonifero Superiore-Permiano Inferiore)**
 Tilliti scure con abbondanti intrusioni magmatiche.

- Misikaba Formation (Devoniano)**
 Sandstones arcocici e quarziti con sporadici livelli di shale.

- Natal Metamorphic Province (Proterozoico)**
 Graniti e gnaiss.

SIMBOLI

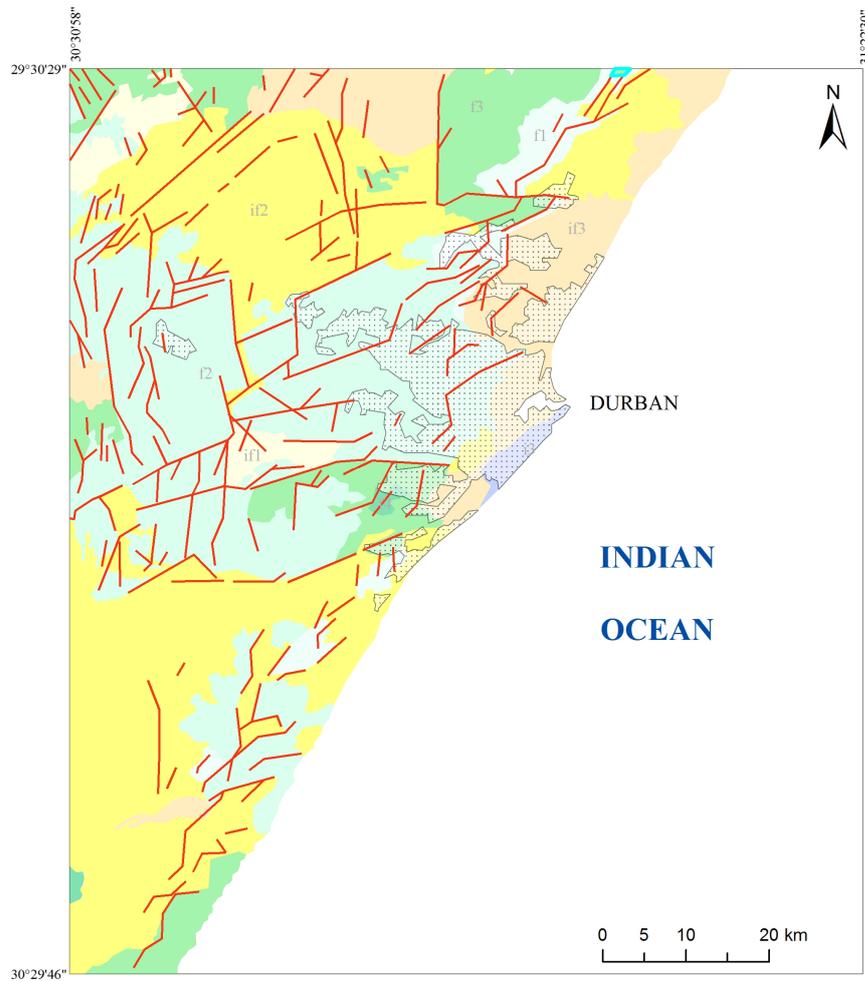
- Area urbana

- Faglie

Figura 29. Carta geologica dell'area di Durban.

Nella caratterizzazione degli acquiferi si fa riferimento alla mappa idrogeologica del foglio di Durban (2928), redatta da G.M King nel 1998 per il “Department of water affairs and forestry South Africa” e rivisitata per questo lavoro di tesi (figura 30). In questa sezione si farà riferimento al lavoro di corredo (King G. M., 2002) alla mappa idrogeologica (King G. M., 1998), nel quale gli acquiferi vengono caratterizzati in funzione del loro rendimento e, come risultato di processi litologici, strutturali e climatici classificati secondo la loro tipologia, ovvero intergranulari, fratturati, carsici e intergranulari-fratturati. La descrizione generale di queste quattro tipologie di acquiferi è già stata affrontata nel capitolo precedente quindi in questa sezione si analizzeranno solo gli acquiferi delle formazioni geologiche d’interesse ovvero in: Maputaland Group, Natal Group e Misikaba Formation, Dwyka Group, Natal Metamorphic Province ed Ecca Group.

CARTA IDROGEOLOGICA DELL'AREA DI DURBAN



SIMBOLI

- Area urbana
- Faglie

TIPOLOGIA DI ACQUIFERO	CLASSI DI RENDIMENTO (l/s)			
	0-0,1	0,1-0,5	0,5-2,0	2,0-5,0
Fratturato	f1	f2	f3	f4
Intergranulare	—	—	i3	—
Intergranulare e fratturato	if1	if2	if3	—

Figura 30. Carta idrogeologica dell'area di Durban.

Iniziando dagli acquiferi intergranulari, l'unica formazione geologica a farne parte nella zona di Durban, è il *Maputaland Group*. Questo Gruppo, come descritto sopra è posizionato lungo la costa ed è composto da sedimenti prevalentemente non consolidati come sabbia, argilla e silt. Il rendimento dei pozzi può risultare anche molto alto come 50l/s (figura 31) ma a causa della sua conducibilità idraulica di 5m/giorno i pozzi possono risultare anche asciutti quindi non presentano un rendimento costante. La tavola d'acqua è molto superficiale, compresa tra i 2 e i 7m sotto il piano campagna.

La qualità delle acque è influenzata dall'ambiente deposizionale, dal mare e dall'attività industriale; questi fattori hanno fatto risalire la conducibilità elettrica delle acque portandola a 100mS/s. Dal punto di vista geochimico queste acque sono ricche di sodio e cloro e ciò conferma la loro natura salina (figura 32), dettata prevalentemente dalla vicinanza con il mare.

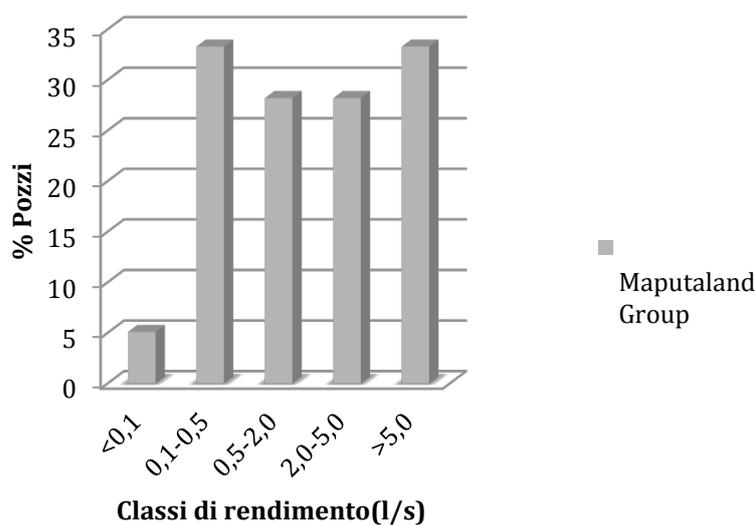


Figura 31. Il grafico mostra il rendimento del Maputaland Group (King G.M., 2002).

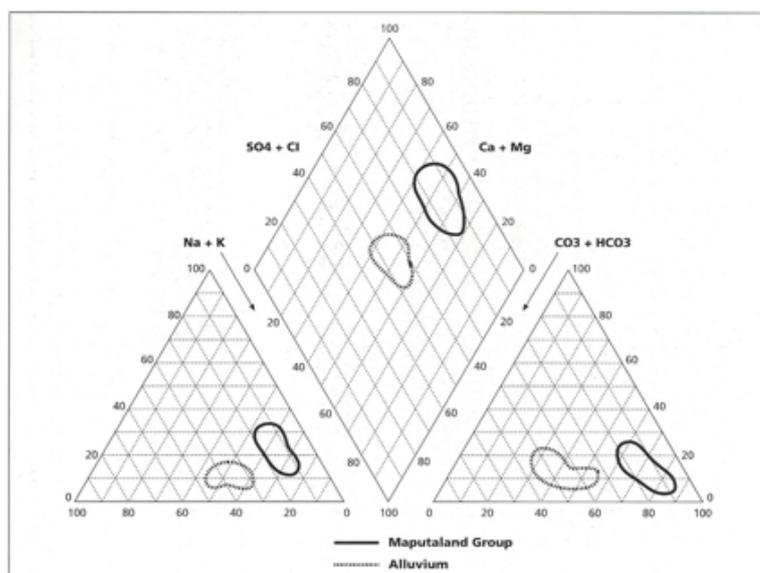


Figura 32. Diagramma di Piper che descrive la geochimica degli acquiferi intergranulari (King G.M., 2002).

Passando ora agli acquiferi fratturati ne fanno parte la Misikaba Formation, il Natal Group e il Dwyka Group. Le condizioni geologiche per la formazione di questi acquiferi sono state causate dalla forte storia tettonico-strutturale (Dingle R. V. et al., 1974; Mendonidis P. et al., 2014)) che ha subito quest'area producendo una serie di faglie, fratture o joint che oggi ospitano acquiferi fratturati. La *Misikaba Formation* e il Natal Group hanno un alto contenuto di quarzo, ed è proprio grazie a questo minerale che le due Formazioni hanno assunto un comportamento fragile descritto dalle numerose fratture alle rocce, che permettono l'infiltrazione dell'acqua la formazione di acquiferi. La concentrazione di faglie o fratture però determina irregolarità nel rendimento degli acquiferi, in quanto zone più fratturate riescono ad ospitare più acqua, mentre zone meno fratturate hanno una capacità di accumulo chiaramente inferiore; questa caratteristica la si può notare dal rendimento dei pozzi, che varia tra 0,11/s a 2l/s con una resa media di 0,51/s (figura 33). Dal punto di vista geochimico invece queste acque hanno una buona qualità (figura 34) con una conducibilità elettrica di circa 100mS/s.

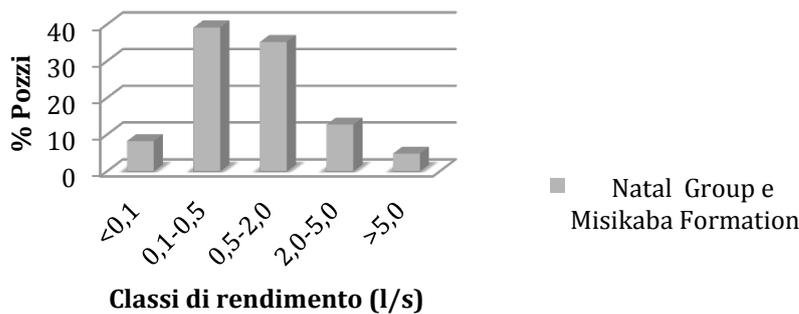


Figura 33. Il grafico mostra il rendimento dei pozzi nel Natal Group e Msikaba Formation (King G.M., 2002).

Nel Dwyka Group, la complessa struttura tettonica rende difficile la ricerca di acqua, infatti sono presenti pochi pozzi rispetto alla Msikaba Formation e al Natal Group, e presentano rendimenti bassi, principalmente tra 0,1l/s e 2l/s (figura 35). Se non fosse per il basso rendimento che ne ostacola l'uso, questi acquiferi contengono acque dalla qualità molto buona, adatte anche all'uso potabile per l'uomo. La conducibilità elettrica varia in un range tra 4 e 400mS/s, con un valore medio di 90mS/s, e questa grande variabilità è dettata dal fatto che le acque più saline, ovvero acque più vicine alla costa assumono valori di conducibilità elettrica molto alti, mentre le acque più "continentali" sono poco saline e hanno valori più bassi. In funzione della posizione degli acquiferi con la costa, varia anche la geochimica delle acque infatti gli acquiferi vicini al mare sono caratterizzati da calcio, sodio e cloruri, mentre acque più interne contengono sodio, potassio e bicarbonato (figura 34).

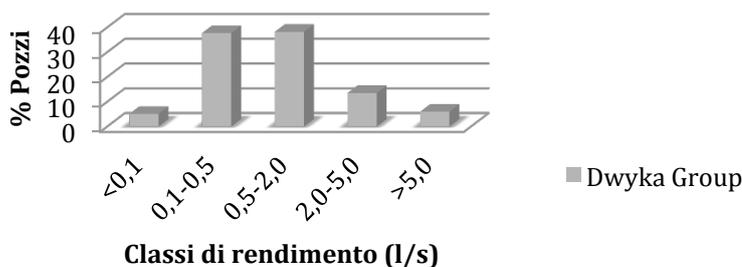


Figura 34. Il grafico mostra il rendimento dei pozzi nel Dwyka Group (King G.M., 2002).

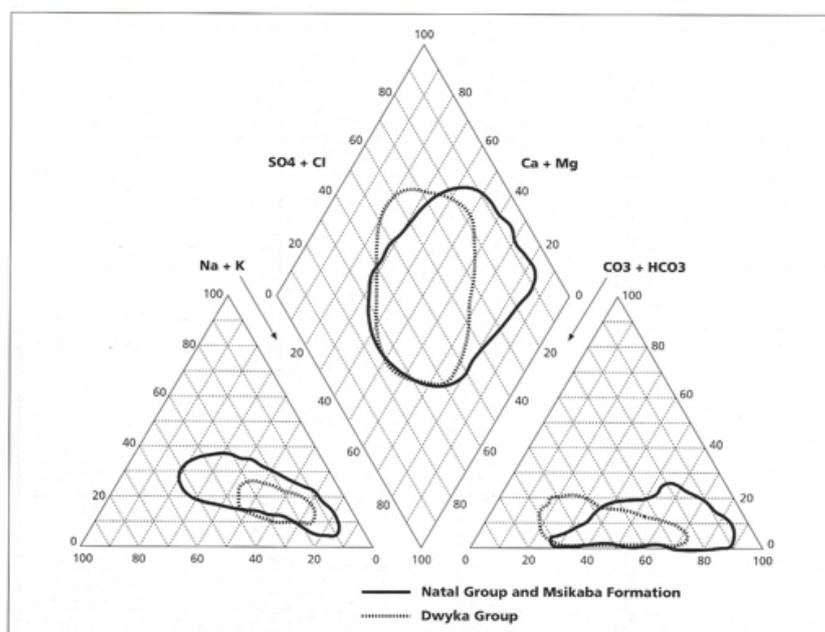


Figura 35. Diagramma di Piper che descrive la geochimica degli acquiferi fratturati (King G.M., 2002).

Per quanto riguarda gli acquiferi carsici ne farebbe parte solo qualche zona della Natal Metamorphic Province, ma si tratta di aree estremamente limitate dove non c'è alcuna informazione sui pozzi e sulla qualità delle acque. Come ultima categoria di acquiferi si vanno ad affrontare gli acquiferi intergranulari e fratturati. Considerata l'area di studio, le formazioni che ospitano acquiferi di questo tipo sono la Natal Metamorphic Province e l'Ecce Group del Karoo Supergroup.

Nella *Natal Metamorphic Province* gli acquiferi sono associati a fratture nelle rocce cristalline, coperti da una porzione alterata vicina alla superficie. In questo modo l'acqua s'infiltra nella zona superficiale, molto porosa ma con una conducibilità idraulica molto bassa, attraversa tutta questa porzione e si accumula nella zona fratturata. La zona di alterazione non supera mai i 25m di profondità e pozzi così superficiali hanno un rendimento generalmente compreso tra 0,1l/s e 0,4l/s (figura 36). La porzione più profonda, ovvero quella interessata da acquiferi fratturati, è chiaramente legata alla storia tettonica della roccia, quindi al grado di fratturazione, e solitamente, acquiferi in questa zona presentano un rendimento

superiore a 0,5l/s (figura 36). Calcio, magnesio e bicarbonato caratterizzano la geochimica di queste acque, dalla buona qualità (figura 37).

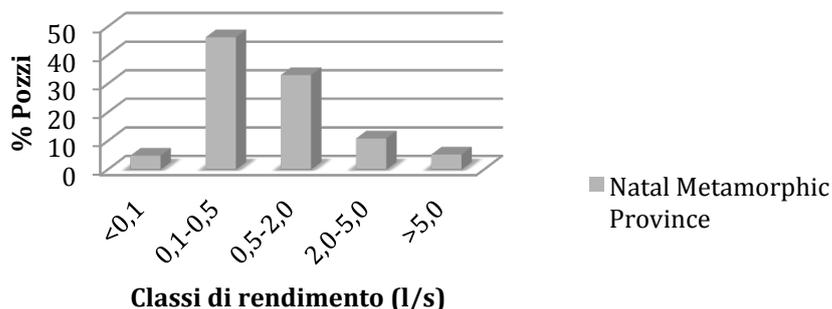


Figura 36. Il grafico mostra il rendimento dei pozzi nella Natal Metamorphic Province (King G.M., 2002).

Come riportato nella descrizione geologica sopra scritta, *l'Ecca Group* è suddiviso in una parte argillitica (Pietermaritzburg e Volksrust Formations) e una parte arenacea rappresentata dalla Vryheid Formation. Tra queste due tipologie di rocce, anche se litologicamente molto differenti, gli acquiferi sono molto simili, presentando rendimenti quasi uguali (figura 37), i quali variano mediamente da 0,9l/s per le argilliti, a 1,2l/s delle arenarie della Vryheid Formations. Dal punto geochimico invece non viene fatta alcuna distinzione e vengono classificate in “Karoo Sedimentary Rocks”, classificando le acque ricche di bicarbonato, calcio e magnesio (figura 38), firma geochimica indice di recente ricarica delle acque, e una conducibilità elettrica di circa 300mS/s.

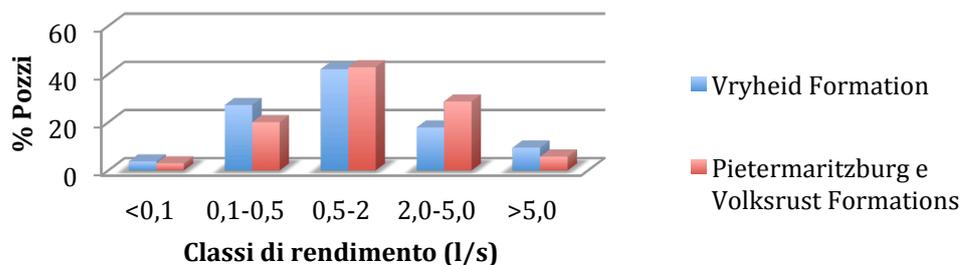


Figura 37. Il grafico mostra il rendimento dei pozzi nell'Ecca Group (King G.M., 2002).

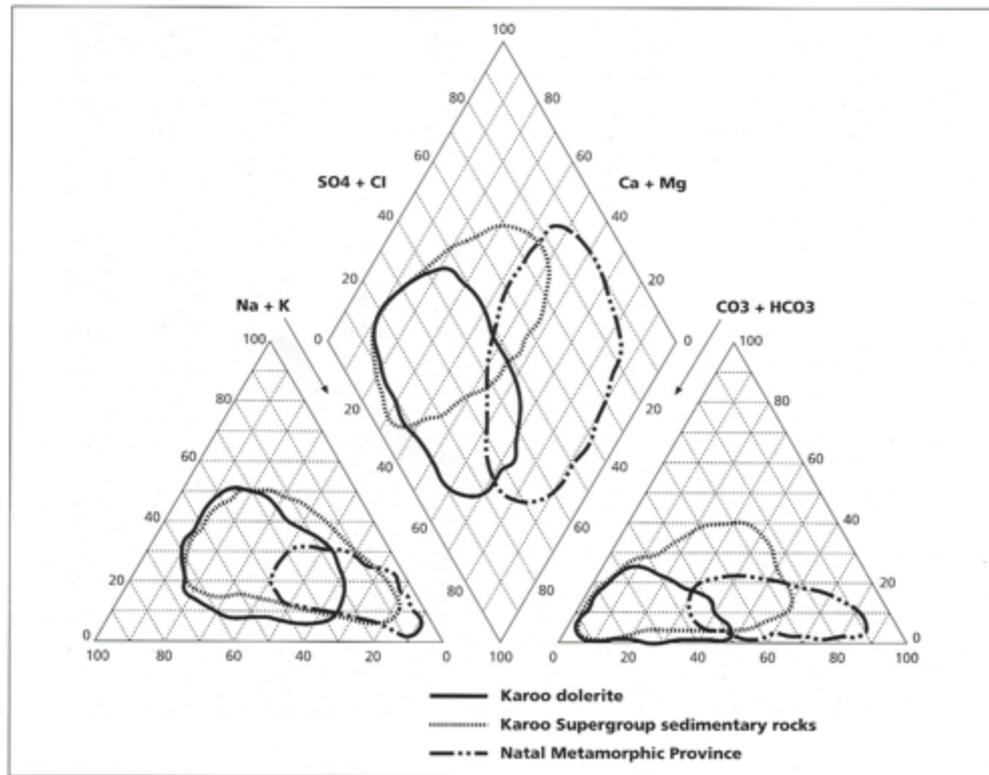


Figura 38. Diagramma di Piper che descrive la geochimica degli acquiferi intergranulari-fratturati (King G.M., 2002).

3.2.2 Clima

Durban si trova nella costa orientale del Sudafrica, direttamente sull'Oceano Indiano a latitudini sub-tropicali. Il clima è classificato come sub-tropicale e lo conferma il paesaggio dal colore verde sgargiante della folta vegetazione che ricopre l'intera area. Il clima sub-tropicale è caratterizzato da estati calde e umide dominate da frequenti piogge ed un inverno mite e leggermente meno umido (Demile et al., 2015). Le temperature medie (figura 39) del mese di gennaio, ovvero nel pieno dell'estate australe, sono intorno ai 23,5°C, mentre a luglio, principale mese dell'inverno australe scendono mediamente a 17,3°C (Bell F.G. et al., 2000). La stagione estiva si imposta generalmente da settembre a marzo mentre la stagione invernale inizia ad aprile e prosegue fino a settembre. Per quanto riguarda le precipitazioni (figura 40), sono più abbondanti nella zona

costiera e possono variare da 800mm di pioggia annui ai 1140mm/anno, con un valore medio nella zona urbana di Durban di 1013mm/anno (South African Weather Service) e la maggior parte delle piogge cadono nella la stagione estiva, durante brevi ma intensi eventi temporaleschi legati al movimento delle correnti oceaniche. La temperatura media annua è superiore ai 20°C, intorno ai 22°C, quindi la temperatura indisturbata del sottosuolo e delle acque degli acquiferi è circa 22°C. Durban, affacciandosi sull'Oceano è leggermente ventosa, e questo influisce sul clima che non lo rende mai troppo caldo ma con una temperatura calda ma gradevole anche grazie alle calde temperature delle Acque indiane costantemente intorno ai 25°C visto che provengono da latitudini equatoriali..

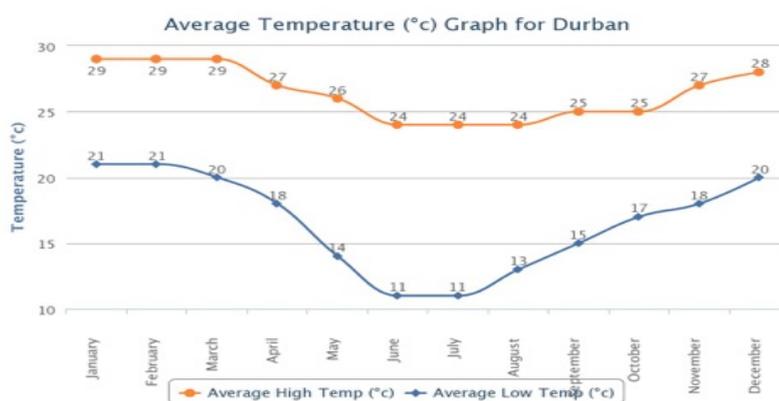


Figura 39. Distribuzione mensile delle temperature medie massime e minime per l'area di Durban. Il grafico è stato realizzato utilizzando dati raccolti tra il 2000 e 2012 (Worldweatheronline).

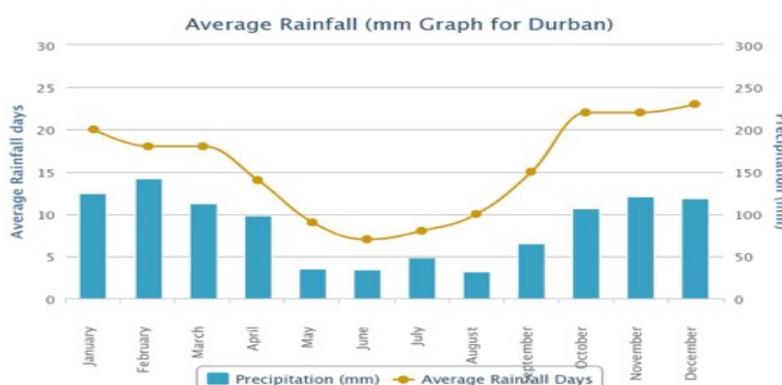


Figura 40. Distribuzione mensile del numero di giorni e dei mm di pioggia nell'area di Durban. Il grafico è stato realizzato utilizzando dati raccolti tra il 2000 e 2012 (Worldweatheronline).

3.3 Cape Town

3.3.1 Geologia e acquiferi

Cape Town per le sue peculiari e forse uniche caratteristiche geologiche-morfologiche, dispone di paesaggi che la rendono famosa in tutto il Mondo. La nota Città si trova a capo di una modesta penisola che funge da spartiacque tra Oceano Atlantico, ad occidente e Oceano Indiano ad oriente. Dal punto di vista geologico, la mappa in figura 41 mostra le principali formazioni geologiche che nel corso della storia si sono instaurate nell'area del Cape Town. In questa tesi ci si dedicherà a trattare in dettaglio solo le formazioni geologiche con i relativi acquiferi dell'area urbana della suddetta città, in quanto area d'interesse per questo studio; le formazioni geologiche di maggior interesse sono: Malmesbury Group, Cape Granite Suite, Table Mountain Group e Sandveld Group.

La vecchia storia geologica di Cape Town inizia nel Precambriano (550-540My) con la formazione del Malmesbury Group (Theron et al., 1992; Hartnady and Rogers, 1990). Questo è costituito da siltstone, arenarie e alcune rocce di basso grado metamorfico. Spesso, la Formazione non affiora perchè coperta da un sottile strato di suolo solitamente sabbioso, tuttavia in qualche punto come attorno a Robbin Island e lungo la costa a Sea Point la si può vedere ben esposta. Il Malmesbury Group è stato successivamente intruso da dicchi mafici e dal Cape Granite Suite (Burger e Coertze, 1973). Il Cape Granite Suite che è una formazione composta da granito, di età Cambriana (540My), caratterizzato da bianchi fenocristalli di feldspato che possono superare i 10cm (Gresse e Theron, 1992). Questo affiora sporadicamente in tutta l'area di Western Cape ma, dei buoni affioramenti e facili da raggiungere sono lungo la costa nei pressi di Camps Bay.

Un'altra importante formazione è rappresentata dal famoso Table Mountain Group, la quale è principalmente composta da arenarie quarzose. Questa appartiene ed occupa la prima delle tre Formazioni del Cape Supergroup di età Ordoviciano-Devoniana (Tankard et al., 1992). L'ultima Formazione che interessa

l'area oggetto di studio sono i depositi quaternari composti da materiale non consolidato come sabbia, del Sandveld Group.

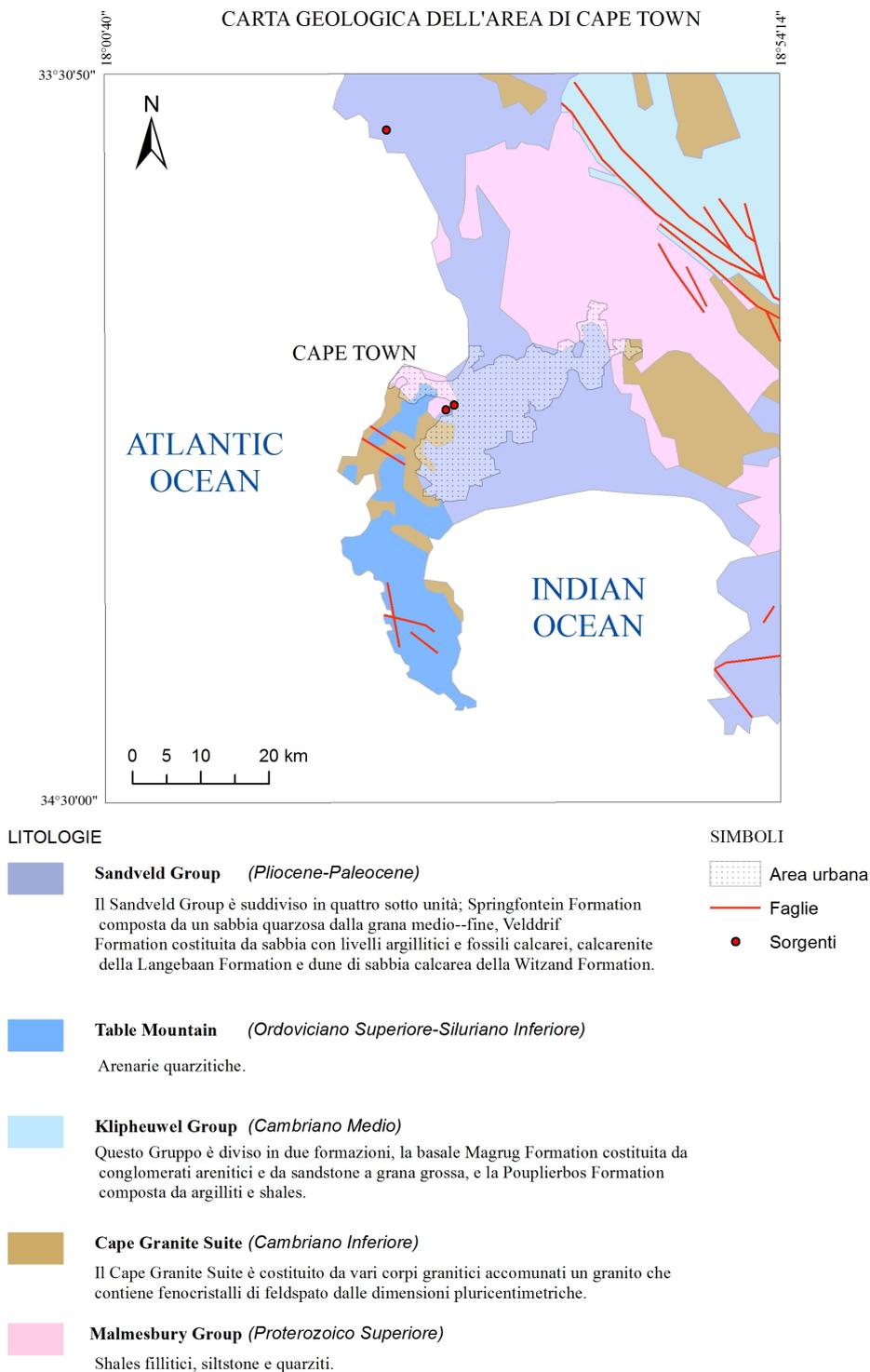
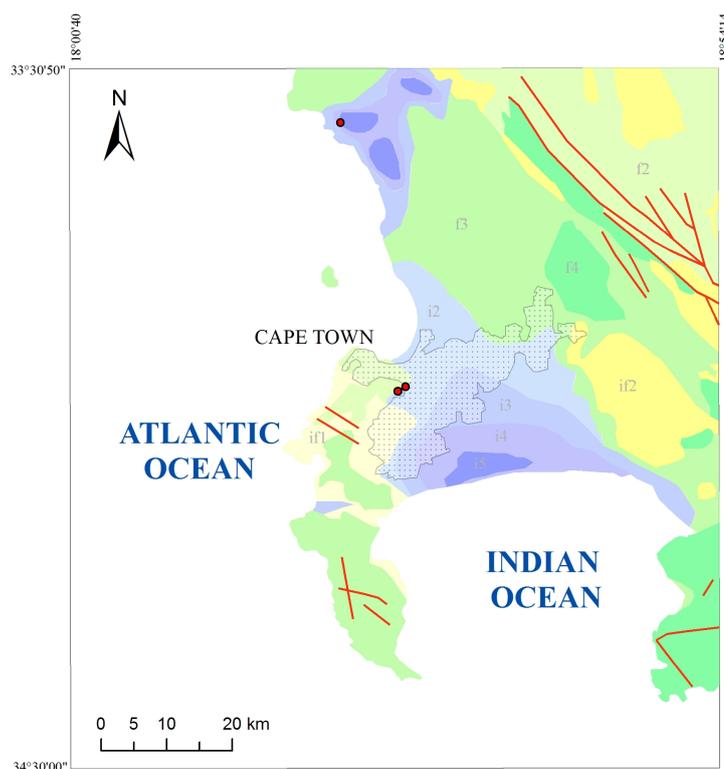


Figura 41. Carta geologica dell'area di Cape Town.

Dal punto di vista idrogeologico, in questa tesi si farà riferimento principalmente al lavoro di Meyer (2001) a completamento della carta idrogeologica (Meyer P.S., 2000) rivisitata per l'area oggetto di studio (Figura 42). Come si è già affrontato per Johannesburg e Durban, gli acquiferi del Sudafrica vengono classificati secondo quattro categorie: intergranulari, fratturati, carsici e intergranulari-fratturati.

CARTA IDROGEOLOGICA DELL'AREA DI CAPE TOWN



SIMBOLI

- Sorgenti
- Faglie
- ▨ Area urbana

TIPOLOGIA DI ACQUIFERO	CLASSI DI RENDIMENTO (l/s)				
	0-0,1	0,1-0,5	0,5-2,0	2,0-5,0	>5,0
Fratturato	—	f2	f3	f4	—
Intergranulare	—	i2	i3	i4	i5
Intergranulare e fratturato	if1	if2	—	—	—

Figura 42. Carta idrogeologica dell'area di Cape Town.

Le formazioni geologiche che nell'area d'interesse rientrano nella categoria degli acquiferi fratturati sono il Malmesbury Group e il Table Mountain Group. Entrambe le formazioni geologiche ospitano acquiferi fratturati a causa della loro storia tettonica e per il comportamento fragile delle rocce che le compongono.

Il *Malmesbury Group*, in tutta la sua estensione (figura 41) ha un'ampia variabilità dal punto di vista strutturale e stratigrafico. In questa formazione, ci sono due zone di dislocazione (Theron et al., 1992) che lo dividono in tre domini tettonici; nella zona sud-ovest (area d'interesse) della carta (figura 41) persiste il Tygerberg Terrane, nella zona centrale il Swartland Terrane e nella zona nord-est il Boland Terrane. Lo Swartland Terrane, situato nel settore d'interesse è composto da shales fillitici, siltstone e quarziti. La natura litologica di questa formazione non è molto adatta nell'ospitare acqua sotterranea, tuttavia ci sono alcune condizioni che fanno eccezione come le due zone di dislocazione, al contatto con il Table Mountain Group e al contatto con le intrusioni granitiche o con dicchi mafici. Il rendimento dei pozzi ubicati in questa Formazione è piuttosto vario e come si vede in figura 43 ci possono essere pozzi a rendimento bassissimo, compreso tra 0 e 0,1l/s, e altri ad alto rendimento, maggiore di 5l/s, ma la maggior parte dei pozzi ha una resa compresa tra 0,5 e 2l/s.

Le condizioni geochimiche delle acque del Malmesbury Group (figura 44 e tabella 11) variano estremamente da una litologia all'altra, infatti il range di conducibilità elettrica varia da 10 a 1000mS/s.

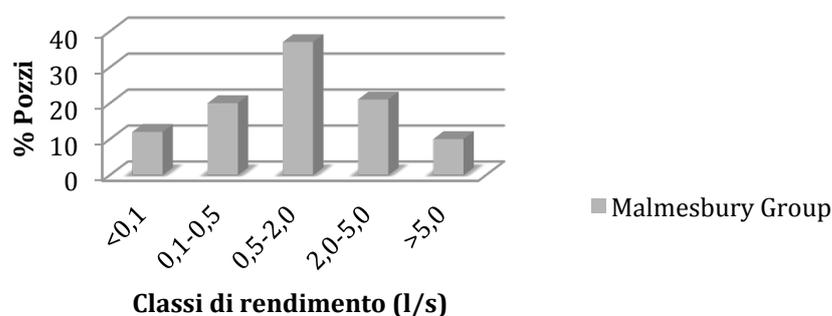


Figura 43. Rendimento dei pozzi nel Malmesbury Group (Meyer P.S., 2001).

Parameter	A	B	C
Electrical Conductivity (mS/m)	34,6	70,7	1020
Total Dissolved Salts (Mg/l)	172	448	6139
pH	8	7,1	7,6
Sodium (mg/l Na)	39	67,1	1830
Potassium (mg/l K)	0,5	2,36	36,9
Calcium (mg/l Ca)	6	42,4	106
Magnesium (mg/l Mg)	9	19,5	253
Chloride (mg/l Cl)	69	95,6	3196
Sulphate (mg/l SO ₄)	4	75,7	518
Total Alkalinity (mg/l CaCO ₃)	26	118,6	155
Fluoride (mg/l F)	0,3	0,61	1,3
NO ₃ +NO ₂ (mg/l)	2,99	0,02	2,42
PO ₄ (mg/l)	0,016	0,01	0,009
Si (mg/l)	14,2	4,75	8,1
NH ₄ (mg/l)	0,04	0,02	0,04

Tabella 11. Geochimica delle acque relativa ai campioni A,B,C nel Malmesbury Group (Meyer P.S., 2001).

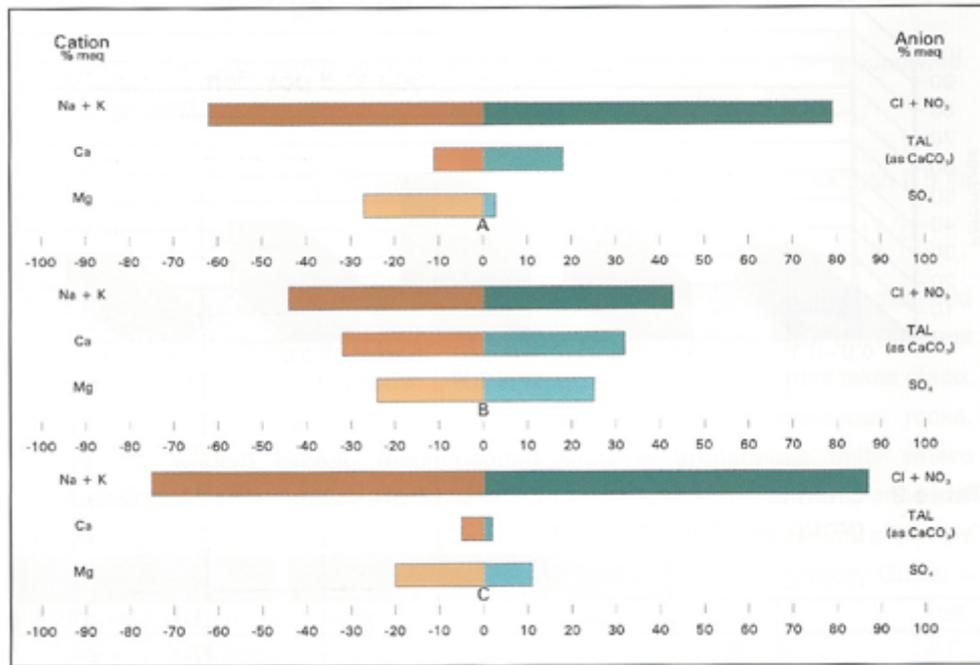


Figura 44. Chimica delle acque relativa ai campioni A,B,C nel Malmesbury Group (Meyer P.S., 2001).

La seconda formazione geologica che ospita acquiferi fratturati è il *Table Mountain Group*. Questa formazione riportata in figura 41, è composta da sei unità le quali mantengono prevalentemente lo stesso carattere litologico, ovvero arenarie quarzitiche per uno spessore totale di 2Km (Theron et al., 1992). Questa Formazione, nonostante abbia un'unica natura litologica, non presenta di caratteristiche idrogeologiche uniformi. Gli acquiferi nella Table Mountain Group sono dominati da un complesso network di fessure, joints e fratture che permettono all'acqua di infiltrarsi e accumularsi nella roccia (Lin L. et al., 2014) visto il carattere fragile delle arenarie quarzitiche. Grazie a queste caratteristiche il tasso di ricarica degli acquiferi nella suddetta Formazione è del 15% delle precipitazioni medie annue. In accordo con Meyer (2001), una caratteristica del Table Mountain Group è quella di avere numerose sorgenti di acqua naturale e anche termale. I pozzi, nonostante possano avere un rendimento superiore a 5l/s (figura 45) sono pochi, per due principali motivi: irregolarità della falda e alto costo delle perforazioni. Visto lo spessore di questa formazione, pari a 2000m il network di fratture è molto esteso e quindi la falda non ha un livello costante ma varia in funzione delle fratture, che possono estendersi per tutto lo spessore del Table Mountain Group. Gli alti costi di perforazione invece, sono dettati dalla forte durezza delle arenarie quarzitiche e dalla profondità dei pozzi che potrebbero essere superficiali, come molto profondi per le ragioni sopra spiegate. Dal punto di vista geochimico, queste acque presentano un valore di conducibilità elettrica compreso tra 5 e 70mS/s (figura 46 e tabella 12) e una natura generalmente sodica.

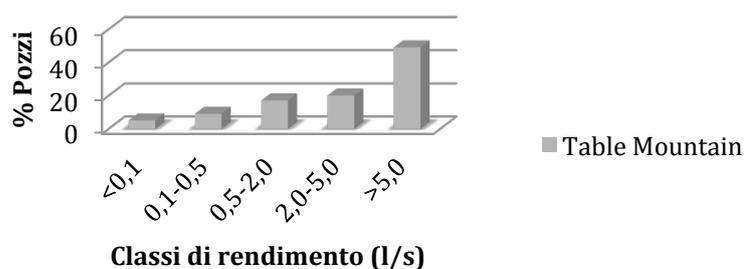


Figura 45. Rendimento dei pozzi nel Table Mountain Group (Meyer P.S., 2001).

Parameter	A	B	C
Electrical Conductivity (mS/m)	5	36	7,8
Total Dissolved Salts (Mg/l)	21	203	51
pH	6,95	7,4	6,4
Sodium (mg/l Na)	3,9	25	7,17
Potassium (mg/l K)	0,31	2,3	1,93
Calcium (mg/l Ca)	0,7	28	3,37
Magnesium (mg/l Mg)	1,4	6	1,72
Chloride (mg/l Cl)	7,4	60	12,48
Sulphate (mg/l SO ₄)	4,2	22	1,73
Total Alkalinity (mg/l CaCO ₃)	2,4	48	12,83
Fluoride (mg/l F)	0,09	0,2	
NO ₃ +NO ₂ (mg/l)		0,09	
PO ₄ (mg/l)	0,03	0,009	0,06
Si (mg/l)	5,77	10,5	
NH ₄ (mg/l)	0,01	0,04	

Tabella 12. Geochimica delle acque relativa ai campioni A,B,C nel Table Mountain Group (Meyer P.S., 2001).

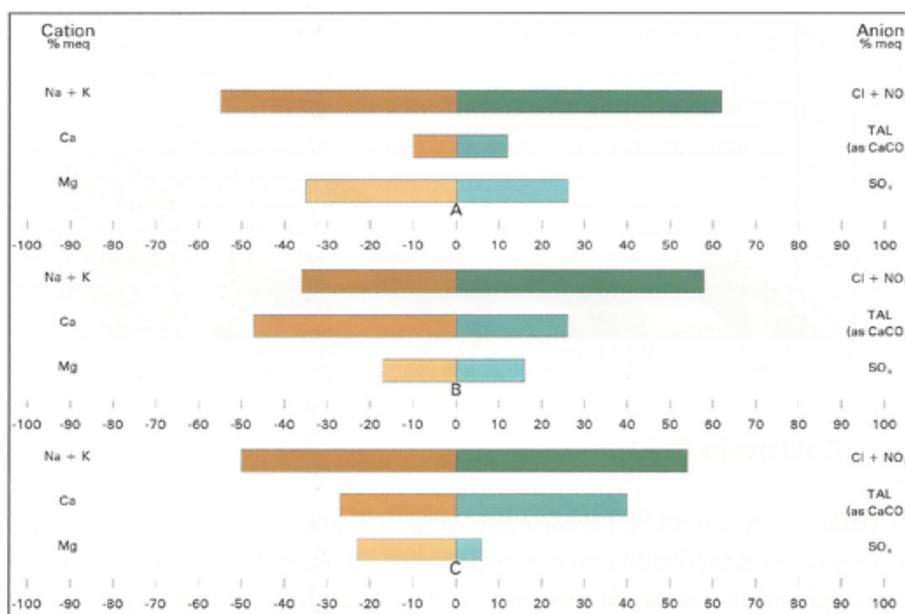


Figura 46. Chimica delle acque relativa ai campioni A,B,C nel Table Mountain Group (Meyer P.S., 2001).

Gli acquiferi del *Cape Granite Suite* appartengono alla categoria di acquiferi intergranulari e fratturati che, come sopra scritto, s'instaurano in rocce solitamente molto alterate in superficie e fratturate in profondità. Nell'area oggetto di studio (figura 41) si vedono svariati corpi granitici tutti accomunati un granito costituito da fenocristalli di feldspato dalle dimensioni pluricentriche (Gresse e Theron, 1992) e cristalli di biotite dalla grana fine. Nel Cape Granite Suite gli acquiferi solitamente sono instaurati in zone di alterazione, zone di contatto tra Cape Granite Suite e Malmesbury Group, zone di contatto con i dicchi e in zone di frattura ma considerata la forte durezza del granito e gli alti costi di perforazione, non ci sono molti pozzi per il loro sfruttamento.

Dai pozzi analizzati nel lavoro di P.S. Meyer (2001), emerge che il 42% di questi ha un rendimento inferiore a 0,5l/s e solo il 5% ha una resa superiore a 5l/s (figura 47) e le acque pesentano un valore di conducibilità elettrica compreso tra 30 e 350mS/s (figura 48 e tabella 13).

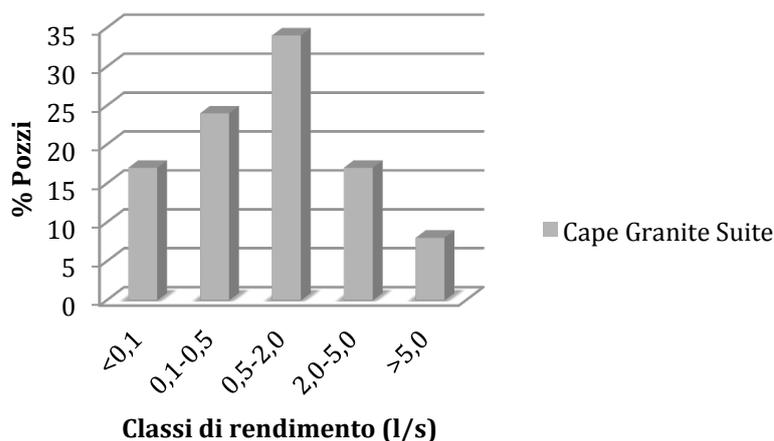


Figura 47. Rendimento dei pozzi nel Cape Granite Suite (Meyer P.S., 2001).

Parameter	A	B	C
Electrical Conductivity (mS/m)	38	124	116,6
Total Dissolved Salts (Mg/l)	243	780	760
pH	6,4	7,3	7,3
Sodium (mg/l Na)	55	131	187,2
Potassium (mg/l K)	3	3,9	4
Calcium (mg/l Ca)	2,4	123	26
Magnesium (mg/l Mg)	4,6	15	35,6
Chloride (mg/l Cl)	86	214	369,2
Sulphate (mg/l SO ₄)	16	274	50,6
Total Alkalinity (mg/l CaCO ₃)	11	90	35,8
Fluoride (mg/l F)		1,5	0,57
NO ₃ +NO ₂ (mg/l)	0,05	0	9,8
PO ₄ (mg/l)			0,22
Si (mg/l)			28,5
NH ₄ (mg/l)			0,5

Tabella 13. Geochimica delle acque relativa ai punti di misura A,B,C nel Cape Granite Suite (Meyer P.S., 2001).

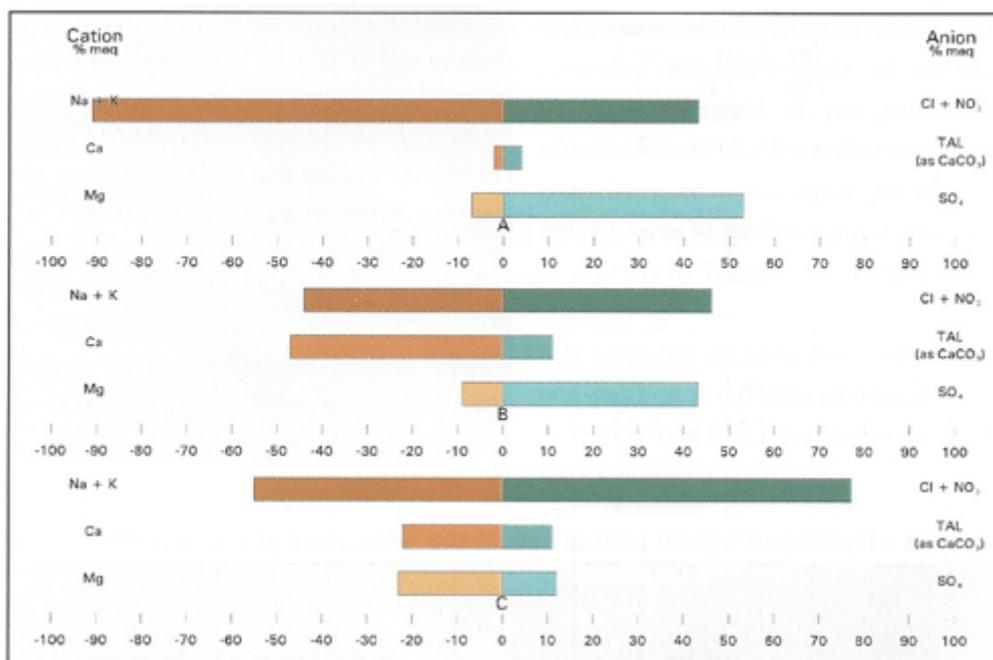


Figura 48. Chimica delle acque relativa ai punti di misura A,B,C nel Cape Granite Suite (Meyer P.S., 2001).

Gli acquiferi intergranulari occupano il 14% dell'area di Cape Town (Meyer P. S., 2000) e si instaurano nel Sandveld Group, Bredasdorp Group e in depositi alluvionali. In questa tesi si andranno ad affrontare solo gli acquiferi del *Sandveld Group* in quanto unica formazione di questa categoria di acquiferi nell'area d'interesse (figura 41). Il Sandveld Group è suddiviso in quattro sotto unità; la prima, ovvero l'unità basale è la Springfontein Formation composta da un sabbia quarzosa dalla grana medio-fine, la seconda è rappresentata dalla Velddrif Formation costituita da sabbia con livelli di fango e fossili calcarei, la terza è la calcarenite della Langebaan Formation ed in ultimo ci sono le dune di sabbia calcarea della Witzand Formation. Secondo il lavoro di Meyer (2001) il 41% dei pozzi in questa formazione ha un rendimento di 0,5l/s, mentre il 30% rende più di 2l/s (figura 49) e le acque presentano una conducibilità elettrica che varia da 30 a 250mS/s a seconda del pozzo in analisi (figura 50 e tabella 14). Dalla geochimica di queste acque si evince che nelle aree urbane possano risentire dell'inquinamento, mentre negli acquiferi in prossimità della costa spesso risentono della salinità dell'acqua oceanica.

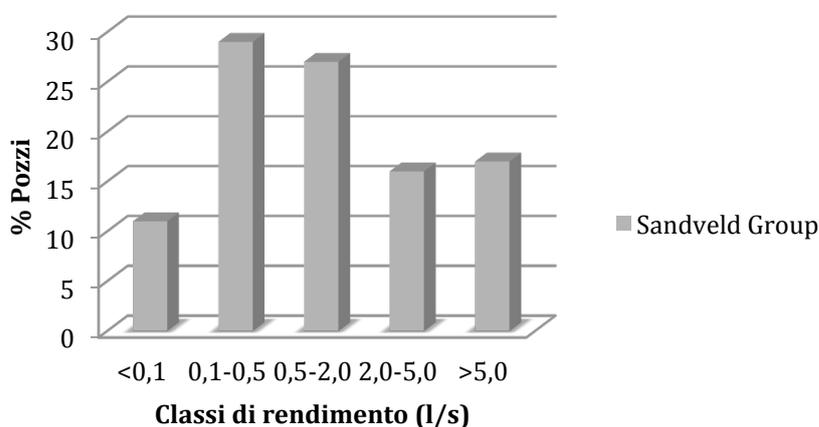


Figura 49. Rendimento dei pozzi nel Sandveld Group (Meyer P.S., 2001).

Parameter	A	B	C
Electrical Conductivity (mS/m)	53,5	82,8	85,4
Total Dissolved Salts (Mg/l)	365	472	516
pH	8	6,2	7,6
Sodium (mg/l Na)	21	61	85
Potassium (mg/l K)	1,5	8,3	6,9
Calcium (mg/l Ca)	70	36	56
Magnesium (mg/l Mg)	6	26	10
Chloride (mg/l Cl)	29	101	126
Sulphate (mg/l SO ₄)	33	75	13
Total Alkalinity (mg/l CaCO ₃)	157	26	180
Fluoride (mg/l F)	0,19	<0,10	0,22
NO ₃ +NO ₂ (mg/l)	2,86	30,06	0,04
PO ₄ (mg/l)	0,014	0,007	0,007
Si (mg/l)	2,9	2,6	8,9
NH ₄ (mg/l)	0,05	0,04	0,05

Tabella 14. Geochimica delle acque relativa ai punti di misura A,B,C nel Sandveld Group (Meyer P.S., 2001).

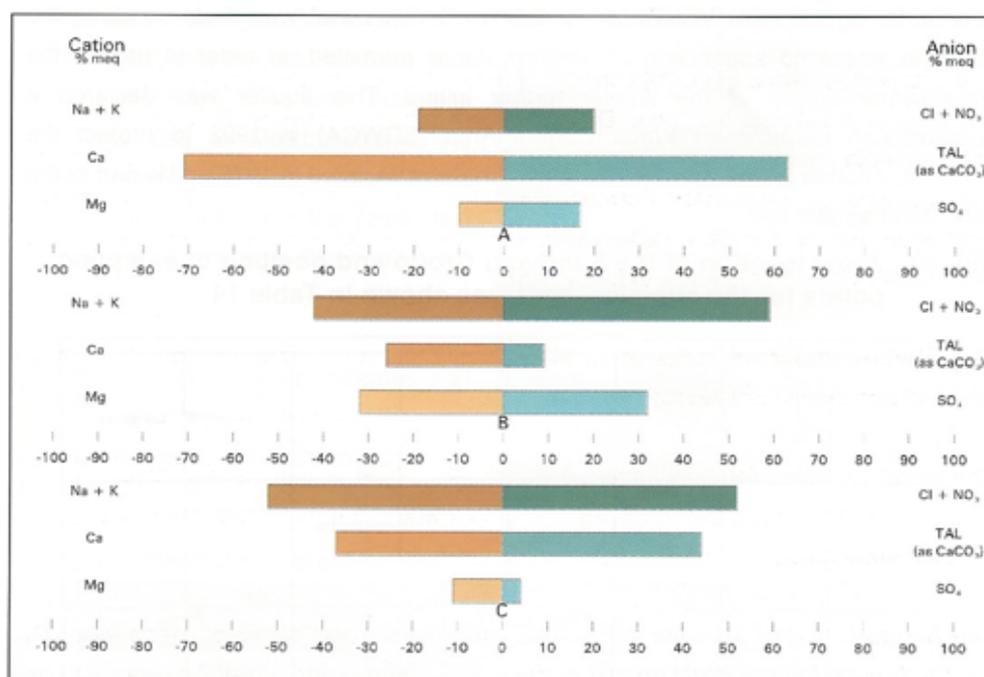


Figura 50. Chimica delle acque relativa ai punti di misura A,B,C nel Sandveld Group (Meyer P.S., 2001).

3.3.2 Clima

Cape Town è insediata in una zona dominata da un clima mediterraneo, caratterizzato da estati calde ed inverni miti. Vista la morfologia nei dintorni di questa città, ovvero i rilievi che la bordano (Table Mountain), Cape Town ha molti microclimi, infatti proprio a causa della barriera costituita dalle montagne e alcune parti della Città ricevono più precipitazioni rispetto ad altre. La lunga estate si sviluppa essenzialmente tra novembre e marzo, con picchi di temperature massime nei mesi di dicembre, gennaio e febbraio. In questi tre mesi ci si può aspettare temperature di 28-29 ° C (figura 51), anche se a volte si può andare oltre i 30°C. Questi sono i mesi più secchi dell'anno nei quali solitamente ci sono solamente un paio di giorni di pioggia al mese. Settembre e ottobre sono i mesi primaverili, dove c'è il boom della vegetazione del tutto simile alla macchia mediterranea con temperature che si aggirano intorno 21-23 ° C durante il giorno e sui 10°C durante la notte (figura 51). Aprile e maggio sono i mesi autunnali e solitamente i più piovosi. Le temperature sono simili alla primavera ma, come sopra scritto con giornate decisamente più piovose.

L'inverno non è mai particolarmente freddo, infatti le temperature durante il giorno arrivano a poco meno di 20°C e durante la notte, la colonna di mercurio può scendere a circa 7-8 ° C. L'inverno solitamente s'instaura da giugno ad agosto e questi rappresentano alcuni dei mesi più piovosi e ventosi di Cape Town, caratterizzati da forti temporali. Nella penisola del Capo, ci sono due principali correnti oceaniche che influenzano il clima. Queste due correnti sono la tropicale "Agulhas Current" nel settore sud-est della penisola che porta acque ad una temperatura compresa tra 22 e 29°C (Heydorn A.E.F. e Tinley K.L., 1980), e la fredda "Benuela Current" lungo la costa atlantica, che porta acque tra gli 8 e 14°C. La piovosità varia da zona a zona infatti l'area costiera, con i suoi 300-500mm/anno (figura 52) risulta essere l'area con piovosità maggiore, per poi diminuire verso l'entroterra. Infine un aspetto climatico caratteristico di Cape

Town è il forte vento che soffia tutto l'anno e che da recenti studi (Tshibanda M. et al., 2013) viene sfruttato per la produzione di energia elettrica.

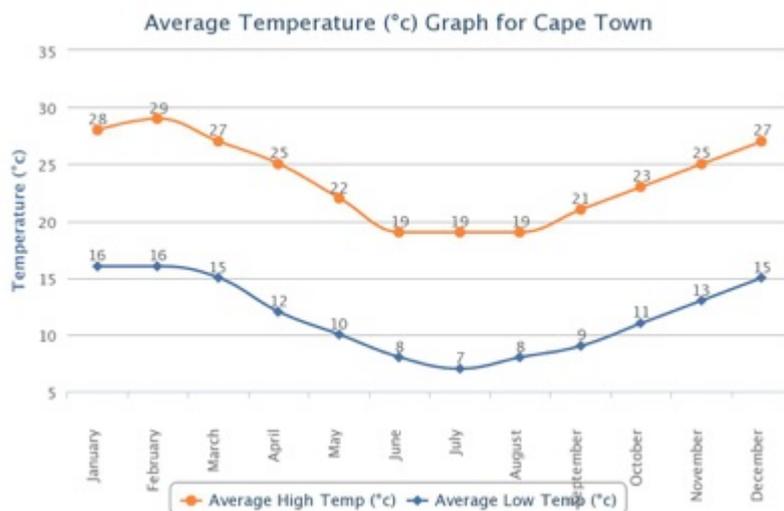


Figura 51. Distribuzione mensile delle temperature medie massime e minime per l'area di Cape Town. Il grafico è stato realizzato utilizzando dati raccolti tra il 2000 e 2012 (Worldweatheronline).

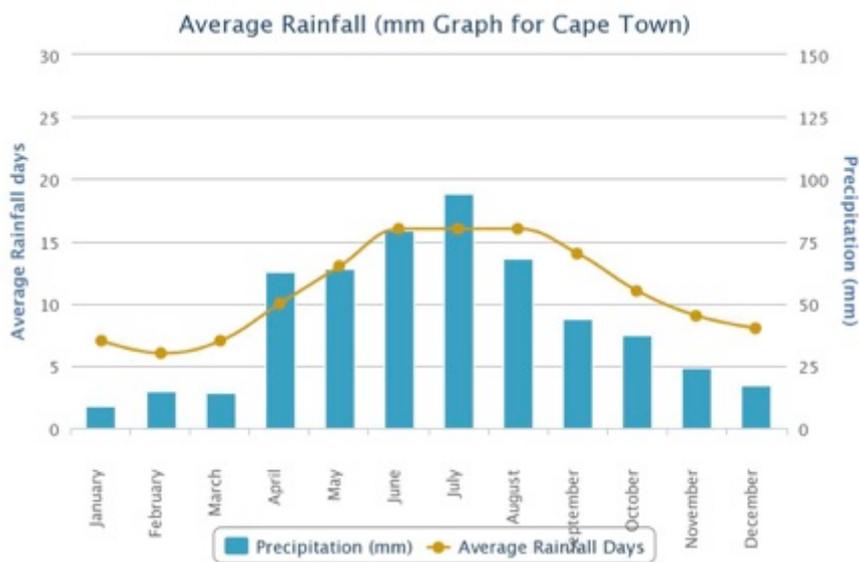


Figura 52. Distribuzione mensile del numero di giorni e dei mm di pioggia nell'area di Cape Town. Il grafico è stato realizzato utilizzando dati raccolti tra il 2000 e 2012 (Worldweatheronline).

4. Geotermia e sistemi geotermici di bassa entalpia

4.1 Generalità della geotermia di bassa entalpia

La geotermia, ai giorni d'oggi costituisce una delle possibili soluzioni energetiche, forse la più interessante, per garantire al Pianeta un futuro migliore e basato sulle risorse che esso offre e che sono disponibili in misura illimitata e rinnovabile. Per geotermia s'intende lo sfruttamento di una risorsa naturale offerta dal Pianeta per produrre energia o per utilizzarla come scambiatore di calore. Considerata la continua infrastrutturazione di tutto il Pianeta e l'incremento dei gas serra da essa prodotta, la geotermia offre una soluzione ideale per ridurre l'inquinamento atmosferico.

Esistono essenzialmente tre tipologie di geotermia: di alta entalpia, di media entalpia e di bassa entalpia (Banks D., 2009; Dassargues A. et al., 2010). Le prime due tipologie sono legate allo sfruttamento del calore terrestre di alta e media temperatura come manifestazioni vulcaniche o termali, mentre in questa tesi ci si dedicherà, e si cercherà di valorizzare la geotermia di bassa temperatura, ovvero per temperature inferiori ai 40°C. La geotermia di bassa entalpia o geoscambio termico trova applicazione solitamente in edifici di varia tipologia, come residenziale, industriale, attività commerciali e altro ancora, nei quali, lo spettro di utilizzo è ampio, dalla climatizzazione, alla produzione di acqua sanitaria o combinando la climatizzazione con altre tecnologie (sistemi ibridi) (Danielewicz J. et al., 2013). Gli impianti geotermici generalmente possono essere a circuito chiuso, a circuito aperto e sistemi ibridi (Qualls C., 2013; Qualls C., 2012). Gli impianti a circuito chiuso sfruttano delle sonde poste dentro il terreno o roccia, che possono essere orizzontali o verticali, e all'interno di tubature poste dentro di esse circola un fluido termovettore che può accumulare o dissipare calore. Gli impianti a circuito aperto invece servono anch'essi per scambiare calore con il sottosuolo ma lo fanno tramite dei pozzi che arrivano alla falda; l'acqua può essere prelevata e/o reimpressa in acquifero come mezzo per scambiare calore con l'impianto di climatizzazione. In ultimo esistono sistemi ibridi i quali sfruttano i

due sistemi geotermici sopra citati accoppiati ad altri sistemi energetici naturali come il vento (Okazaki T. et al., 2015), la radiazione solare o altro. La soluzione geotermica di bassa entalpia accoppiata a pompe di calore, talvolta rappresenta una soluzione molto interessante laddove ci siano le caratteristiche geologiche e climatiche idonee e vantaggiose all'utilizzo di questi innovativi impianti. Soluzioni di geoscambio risultano convenienti innanzitutto per climi che presentano una forte escursione termica stagionale, in modo che la temperatura indisturbata del terreno, o degli acquiferi, che solitamente è pari alla media delle temperature annue, rappresenti un punto d'incontro tra i picchi caldi estivi, e quelli freddi invernali. In questo modo la temperatura media del terreno risulterebbe vantaggiosa sia in termini di riscaldamento che di raffrescamento (Abdeen M. O., 2008; Florides G. et al., 2007), visto che durante la stagione estiva mantiene una temperatura minore rispetto a quella dell'aria e quindi vantaggiosa per il raffrescamento, mentre d'inverno l'acqua di falda o il sottosuolo mantengono una temperatura più calda rispetto a quella dell'aria e quindi più vicina al clima idoneo per la climatizzazione invernale. In generale, un impianto geotermico è un impianto composto da una pompa di calore accoppiata ad una sorgente termica. Come sopra scritto, la sua funzione è quella di produrre acqua o aria calda o fredda a seconda degli usi e della tipologia di impianto, dove chiaramente, la sorgente termica da utilizzare è l'acqua o il sottosuolo.

Impianti di questo tipo stanno prendendo sempre più piede in Europa e negli USA, ed in particolari casi come in Svizzera, paese leader nel mondo per l'utilizzo di questa nuova tecnologia ha addirittura rimpiazzato gli impianti tradizionali (tabella 15).

L'energia geotermica, dunque, la si può descrivere con quattro aggettivi (Bruno R. et al., 2011): *rinnovabile* visto che per quanto calore si possa estrarre, la ricarica termica del terreno è inesauribile, *delocalizzata* poiché applicabile quasi in ogni luogo, *economica* visto che una volta installato il sistema, la produzione dell'energia richiede costi molto bassi di mantenimento rappresentati dall'energia elettrica spesa dalle pompe di circolazione e dal compressore della pompa di

calore ed infine *ecologica* in quanto, non essendo presenti processi di combustione, non vengono liberate in atmosfera emissioni inquinanti di alcun tipo.

	Potenza installata MWtermici	Popolazione Milioni di abitanti	Potenza pro capite W/abitante
Austria	300	8,05	37,27
Canada	435	31,4	13,85
Cina	631	1300	0,49
Repubblica Ceca	200	10,22	19,57
Danimarca	309	5,39	57,33
Finlandia	260	5,3	49,06
Germania	400	83,4	4,80
Olanda	235	16,1	14,60
Norvegia	600	4,55	131,87
Svezia	3840	8,99	427,14
Svizzera	532	7,3	72,88
USA	7200	288	25,00
Italia	30	62	0,48

Tabella 15. Diffusione degli impianti geotermici nel mondo (Basta S. e Minchio F., 2008).

4.2 Sistemi geotermici a circuito chiuso

Parte fondamentale di un sistema geotermico a circuito chiuso sono indubbiamente le sonde, che possono essere verticali oppure orizzontali in funzione dell'uso e delle condizioni del sottosuolo.

4.2.1 Sonde geotermiche verticali

Le *sonde geotermiche verticali* generalmente raggiungono profondità indicate per legge, ma nel record mondiale variano tra i 50 e i 350m in funzione dell'utilizzo e del sottosuolo, anche se nella maggior parte dei casi non scendono sotto i 100m. Chiaramente le sonde che raggiungono profondità superiori ai 100m, vengono

utilizzate per funzioni di riscaldamento, in quanto sfruttando il gradiente geotermico della Terra, che mediamente ha il valore di $30^{\circ}\text{C}/\text{Km}$, raggiungono efficienze migliori. Le tipologie di sonde sono due (Basta S. e Minchio F., 2008), a U, che a loro volta si suddividono in singola U e doppia U, e scambiatori coassiali, suddivise in tubi coassiali semplici e complessi (figura 53). Solitamente la soluzione a U è adottata nella maggior parte dei casi, vista la sua elevata affidabilità, e se progettata correttamente è la tipologia di sonda che presente meno guasti.

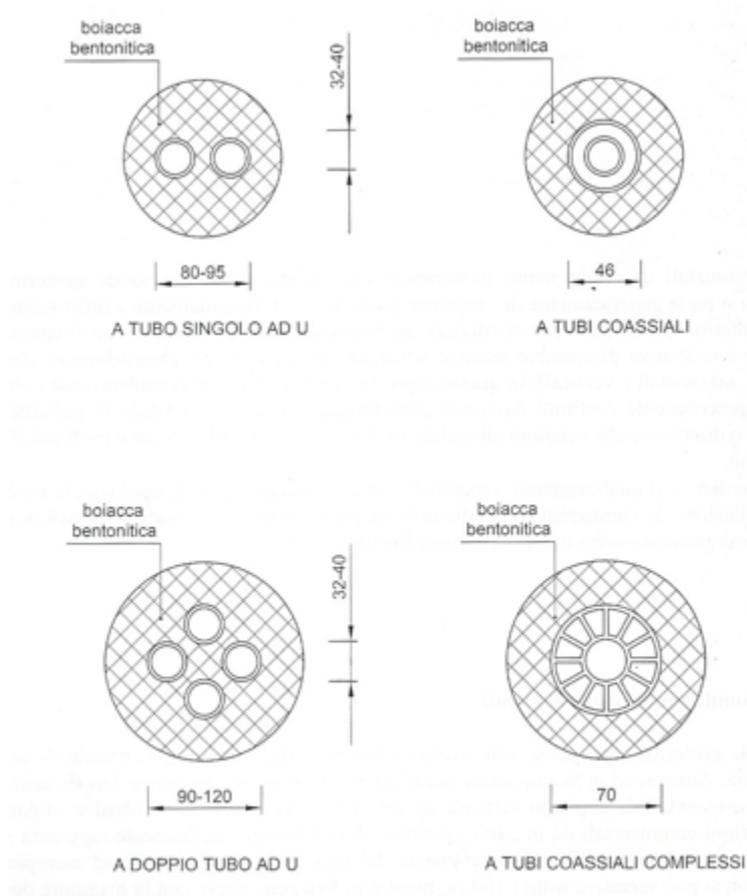


Figura 53. Tipologie di sonde verticali (Basta S. e Minchio F., 2008).

Le sonde geotermiche sono realizzate mediante una macchina perforatrice che realizza un buco nel sottosuolo dove all'interno viene inserita la tubazione a U o

coassiale, che di solito è in polietilene, vista la praticità di lavorazione, il costo non troppo elevato e le buone caratteristiche tecniche.

L'intercapedine tra terreno e tubazione è riempita da un cemento bentonitico (Lee C. et al, 2015), che viene calato lentamente nel foro dal fondo fino al piano campagna per farlo ben aderire alla tubazione, in modo che non rimangano spazi vuoti che alterino lo scambio termico tra sonda e terreno riducendone drasticamente l'efficienza; quindi la buona messa in opera del cemento bentonitico è fondamentale per una buona efficienza del sistema geotermico. Il materiale di riempimento, che come sopra scritto, può essere cemento bentonitico deve avere delle particolari caratteristiche per garantire lo scambio termico come: deve essere compatibile con l'ambiente, avere una conduttività termica simile a quella del sottosuolo, non deve essere solubile in acqua anzi, deve essere leggermente espansivo in modo da sigillare possibili falde (Dehkordi S. E. et al, 2014).

Per un buon scambio termico, è necessario avere valori di conducibilità termica del sottosuolo più alta possibile come graniti o sottosuoli ricchi d'acqua ($<3,0 \text{ WK}^{-1}\text{m}^{-1}$).

Una volta realizzata la sonda, prima che possa essere funzionante va riempita da un fluido termovettore che solitamente è acqua o acqua e glicole. Questo fluido permette di scambiare energia con il sottosuolo, ovvero a seconda delle esigenze permetterà di estrarre o dissipare calore nel sottosuolo. Il fluido termovettore serve appunto per estrarre o dissipare calore, ma nel caso di estrazione del calore se questo ha temperature in equilibrio con il sottosuolo, che per ipotesi si può attribuire un valore generico di 15°C , dopo l'estrazione di calore il fluido può scendere sotto i 0°C quindi, per evitare il congelamento del sistema, è necessario utilizzare fluidi che abbiano una temperatura di congelamento al di sotto degli 0°C , come soluzioni di acqua e glicole. Un fluido termovettore dovrebbe avere le seguenti caratteristiche (Begal, 1996; D. Banks, 2009): non tossico, non infiammabile, stabile, compatibile con i materiali degli altri componenti del sistema, a basso impatto ambientale, non corrosivo, economico, con ottime caratteristiche di scambio termico e con bassa viscosità. I fluidi che più si

avvicinano a queste caratteristiche sono: glicole etilenico, glicole propilenico, metanolo, etanolo, cloruro di sodio, cloruro di calcio e acetato di potassio ma tra questi, l'anticongelante più utilizzato è il glicole propilenico. Le tre principali caratteristiche fisiche dei fluidi termovettori che ne determinano la scelta di uno piuttosto di un altro sono viscosità, calore specifico e punto di congelamento che vengono riportati in tabella 16.

Il dimensionamento di suddette sonde rappresenta una fase progettuale estremamente delicata e complessa, visto che la durata di queste opere è stimata superiore ai 100 anni e quindi, anche un piccolo errore in questa fase avrebbe ripercussioni notevoli.

SOLUZIONE	%	Visc. Cin. (mm^2/s)		Cal. Spec. (KJ/KgK)		P cong. (°C)
Acqua	0		1.8		4.21	0
Glicole etilenico	25	6.0	4.3	3.78	3.80	-14
	33	9.0	5.9	3.55	3.58	-21
Glicole propilenico	25	10.0	6.0	3.92	3.93	-10
	33	15.0	8.0	3.7	3.75	-17
Carbonato di potassio	25	3.7	2.7	3.07	3.09	-13
	33	4.9	3.5	2.81	2.84	-20
Cloruro di calcio	20	3.9	2.6	3.03	3.06	-18
Metanolo	25	5.2	3.3	3.98	4.02	-20
Etanolo	25	10.5	6.0	4.25	4.25	-15

Tabella 16. Proprietà dei diversi tipi di anticongelante (Begal, 1996).

4.2.2 Scambiatori geotermici orizzontali

Una seconda tipologia di sistemi geotermici a circuito chiuso è realizzata mediante *scambiatori geotermici orizzontali*, (Safa A. A. et al, 2015; Basta S. et al, 2008; Banks D., 2012) indubbiamente meno diffusi delle sonde verticali, ma che si avvalgono di metodologie sempre più avanzate e affidabili. Normalmente queste particolari sonde sono posate a profondità compresa tra 1,5 e 2,5m di

profondità. E' evidente che a queste profondità le tubazioni possano risentire della variazione stagionale delle temperature dell'aria ma, a circa 2m di profondità il picco minimo o massimo di temperatura non avviene nello stesso momento dell'aria esterna, ma con circa un ritardo di un mese ovvero quando le esigenze di riscaldamento o raffrescamento non sono più così estreme.

Questo sistema sfrutta il flusso termico proveniente dalla superficie, che deriva dall'energia solare e dallo scambio termico con l'aria esterna. E' chiaro quindi, che questi sistemi debbano essere installati su ampi spazi di terreno libero e non sotto gli edifici, tale motivo però costituisce un limite sull'utilizzo di queste sonde. La diffusione degli scambiatori orizzontali è avvenuta prevalentemente in America, dove la densità abitativa è molto bassa e ci sono ampi terreni vuoti sui quali è possibile installare tali scambiatori. In Europa invece, sia per le caratteristiche dei terreni, sia per l'alta densità abitativa questi impianti non hanno preso molto piede. Il Sudafrica, laddove ci possano essere le caratteristiche geologiche idonee, sicuramente per la bassissima densità abitativa potrebbe essere un Paese nel quale si può diffondere questa tecnologia.

La facilità di realizzazione e i costi non troppo elevati hanno permesso lo sviluppo di molteplici configurazioni come rappresentato in figura 54. Ci sono svariate classificazioni di questi sistemi in funzione di vari parametri (Basta S. e Minchio F., 2008). Una prima classificazione può essere fatta in funzione della tipologia di scambio termico; ci sono impianti a scambio termico diretto, dove il fluido frigorifero entra direttamente nella sonda, ed altri, i più usati, a scambio termico indiretto dove viene posto uno scambiatore intermedio tra sonda e pompa di calore. Una seconda classificazione può essere fatta in funzione della modalità di realizzazione, ovvero tramite sbancamento dove vengono poste le serpentine, o scavo in trincea dove gli scambiatori vengono alloggiati dentro di queste. La fase successiva alla posa dei loop è il riempimento delle trincee o degli scavi che, come per il grouting nelle sonde verticali, deve essere realizzato facendo particolare attenzione a non lasciare spazi vuoti tra serpentina e terreno, per evitare riduzioni nell'efficienza dell'impianto. Gli scambiatori vengono alloggiati sopra uno strato di 60-120cm di sabbia e limo, e

ricoperti di uno strato dello stesso spessore e dello stesso materiale. Un'alternativa ai suoli sabbioso-limosi sono delle miscele studiate appositamente per incrementare lo scambio termico (Wu R. et al, 2015) ed ottenere prestazioni migliori dell'impianto; solitamente queste miscele sono composte da cemento, acqua, sabbia e ceneri sottili (fly ash).

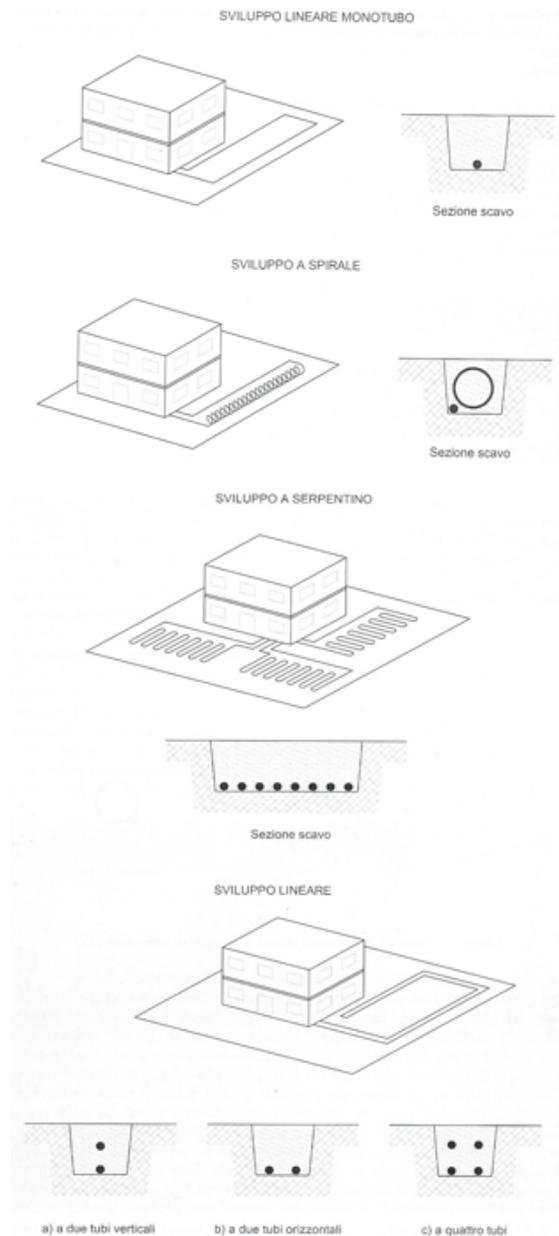


Figura 54. Diverse tipologie di sonde orizzontali (Basta S. e Minchio F., 2008).

4.2.3 Funzionamento di un sistema geotermico a circuito chiuso

Un impianto geotermico a circuito chiuso è composto principalmente da tre parti, la sonda, che come sopra affrontato può essere verticale od orizzontale, una pompa di calore e l'impianto di climatizzazione che varia in funzione dell'edificio e dell'uso. Nel caso ipotetico di una sonda verticale, ma è lo stesso anche per una orizzontale, il fluido termovettore, nel caso di riscaldamento, deve entrare nella sonda ad una temperatura di 4-6 gradi inferiore a quella del sottosuolo (Safa A. A., 2015; Banks D., 2012) in modo che, durante tutto il percorso all'interno di essa, il fluido a contatto con un terreno più caldo possa riscaldarsi e tornare in superficie ad una temperatura superiore di quella di immissione. La differenza di temperatura tra mandata e ritorno viene poi percepita dalla pompa di calore che sfrutta questa variazione per aumentare la temperatura dell'acqua dell'impianto. In caso di raffrescamento avviene esattamente il contrario, viene inserito il fluido termovettore a temperatura superiore di quella del sottosuolo, durante il percorso nella sonda viene ceduto calore al terreno e così, il fluido riemerge a temperatura inferiore di quella di immissione. In figura 55 viene riportato uno schema di funzionamento di un impianto geotermico ideale a sonde orizzontali; lo schema è stato proposto da Basta S. e Minchio F. (2008) facendo riferimento a temperature d'esercizio tipiche della Pianura Padana (Italia).

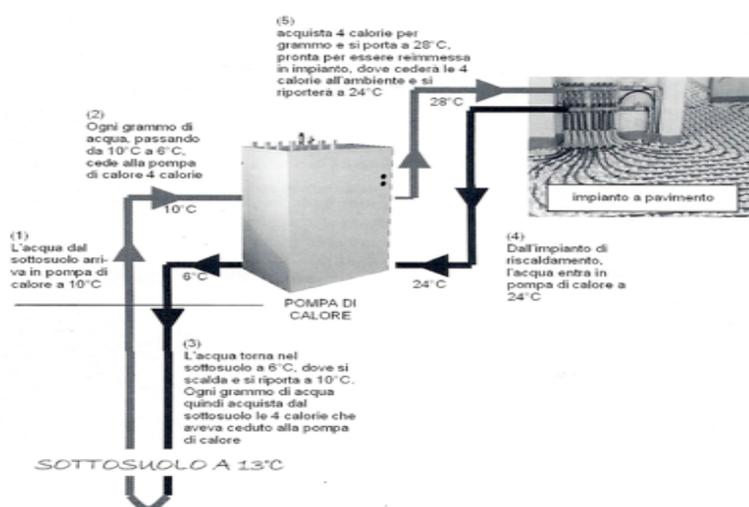


Figura 55. Schema del funzionamento di un impianto geotermico a circuito chiuso (Basta S. e Minchio F., 2008).

4.3 Sistemi geotermici a circuito aperto

Oltre agli impianti geotermici a circuito chiuso, trattati nel precedente capitolo esistono anche sistemi a circuito aperto o “open loop” (Rode A. et al., 2015). Questi scambiano calore con il sottosuolo mediante acqua di falda, o superficiale che consente uno scambio diretto con la pompa di calore. Sistemi geotermici open loop, spesso risultano più efficienti rispetto a quelli a circuito chiuso, ma presentano il grosso limite che la risorsa idrica non è presente ovunque e spesso, dove è presente, la normativa ne vieta o ne limita l’utilizzo. Impianti geotermici a circuito aperto per lo sfruttamento dell’acqua sotterranea chiaramente utilizzano uno o più pozzi, sia per l’estrazione che per la re-immissione di questa; la re-immissione dell’acqua può avvenire mediante un apposito pozzo, mediante lo stesso pozzo di estrazione oppure versata in un corpo idrico superficiale.

Per verificare la fattibilità di tali sistemi è necessario tener presente dei seguenti tre fattori (Rafferty, 2001): qualità delle acque, quantità d’acqua disponibile e scarico dell’acqua utilizzata.

Per qualità delle acque s’intende la sua composizione chimica (tabella 17) che, ai fini di non danneggiare l’impianto deve essere il più possibile povera di ferro per evitare le incrostazioni o corrosioni nel pozzo o nelle tubature.

PARAMETRI	RANGE	INTERAZIONE MATERIALI	AZIONI CORRETTIVE
pH	5,5-8,5	pH acidi catalizzano la corrosione dei metalli, pH basici favoriscono le incrostazioni	Evitare il ricorso di bacini idrici a cielo aperto, usare acciai compatibili
Solidi in sospensione	200-1000 ppm	Aumentano la possibilità di deposito soprattutto in presenza di magnesio, calcio,	Per concentrazioni > 500 ppm richiedere analisi ioni Mg, Ca, CO ₃ , SO ₄

		carbonati e solfati	
Ferro	0-5 ppm	Indice di potenziale presenza di "batteri del ferro"	Eseguire analisi
Indice di Ryznard		Indice del tasso di corrosione/ incrostazione basato sul CaCO ₃	pH > 7,5 tendenza alla corrosione – utilizzare materiali idonei; pH < 6 tendenza incrostazioni – ridurre velocità dell'acqua
Cloro	6-20 ppm	Catalizza corrosione acciaio; realizza microfori	Utilizzare materiali idonei
Bicarbonato/ CO ₂			Se HCO ₃ > 100 ppm e pH > 8, mantenere sul fluido pressione elevata per contenere l'equilibrio chimico
Acido solfidrico	< 0,5 ppm	Aggressivo per rame, nichel e leghe relative	Se H ₂ S > 0,2 ppm evitare ricorso a componenti in Cu e Ni
Ossigeno	< 2,0 ppm	Accelera corrosione acciaio	Degassificare

Tabella 17. Caratteristiche delle acque da utilizzare per sistemi open-loop (Busnardo, 2006), (Rafferty, 2001).

Per conoscere la quantità d'acqua disponibile invece, è necessario compiere buoni studi geologici ed idrogeologici nella zona d'interesse, e in base a questi, progettare l'impianto in modo che il o i pozzo/i di estrazione, non vengano usati in maniera troppo intensiva, perché si potrebbe incorrere nel problema del prosciugamento dell'acquifero. Infine lo scarico delle acque deve rispettare le normative vigenti e talvolta questa fase risulta molto onerosa. Come sopra scritto, impianti geotermici a circuito aperto solitamente utilizzano

due pozzi (figura 56), dove generalmente uno è utilizzato per il prelievo dell'acqua, e l'altro per la restituzione in falda.



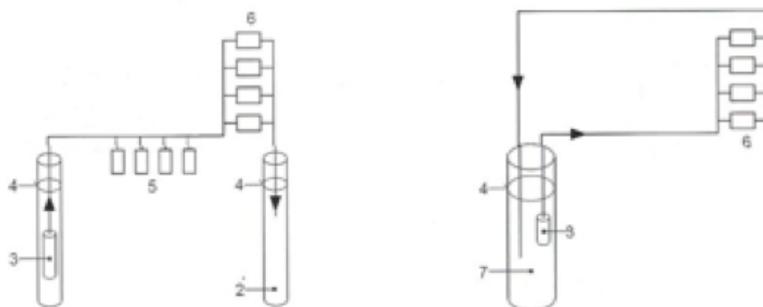
Figura 56. Schema di un tipico impianto a circuito aperto ad acqua di falda (geothermalinstallation.wordpress.com).

4.3.1 Configurazioni e funzionamento di sistemi geotermici a circuito aperto

Il sistema è apparentemente semplice ma in fase di progettazione un minimo errore può compromettere l'intero impianto, infatti bisogna porre particolare attenzione alla combinazione corretta di profondità e portata del pozzo e tipologia e posizionamento dello scambiatore di calore (Song W. et al., 2014; Rode A. et al., 2015; Casasso A. et al., 2015; Basta S. e Minchio F., 2008). Esistono varie tipologie di configurazione per sistemi open loop che vengono rappresentati in figura 57 (Song W. et al., 2014). Il primo in alto a sinistra illustra un sistema diretto, dove l'acqua viene prelevata dalla falda e immessa direttamente nella pompa di calore, senza scambiatori intermedi. Questa configurazione è

solitamente utilizzata per impianti di piccole dimensioni, come residenziali o piccole attività commerciali, ma la si può utilizzare solo in condizioni perfette della qualità delle acque, perché un'acqua particolarmente dura o con pH elevato, può danneggiare notevolmente l'impianto. In alto a destra invece sono raffigurati impianti "standing column", i quali sono costituiti da un unico pozzo molto profondo, generalmente tra i 300 e 450m, il quale pesca acque profonde, che per il gradiente geotermico risultano più calde delle superficiali. Anche in questo caso, come nel precedente, non è presente uno scambiatore intermedio tra pozzo e pompa di calore, quindi è necessario fare particolare attenzione alla qualità delle acque. Infine, la figura in basso a sinistra, rappresenta un impianto open loop a scambio indiretto. Questa tipologia d'impianti è la più usata grazie allo scambiatore tra pozzo e pompa di calore, il quale evita qualunque problematica legata alla geochimica delle acque. Il funzionamento questi è simile a quello del primo caso, ovvero in un pozzo viene prelevata l'acqua, passa attraverso lo scambiatore intermedio, entra nella pompa di calore e nell'impianto di climatizzazione e poi viene reimpressa nell'altro pozzo.

Oltre all'acqua sotterranea, un'altra fonte di scambio può essere l'acqua di corpi idrici superficiali, come fiumi, laghi o mare. In generale, l'impiego di acque superficiali presenta alcuni problemi che rende difficile il loro utilizzo, infatti ci sono punti critici come le variazioni di portata nel corpo idrico durante l'anno, la necessità di filtraggio o desalinizzazione dell'acqua, e i grandi ostacoli burocratici per la salvaguardia della flora e fauna ittica, le quali sarebbero sottoposte a sbalzi termici notevoli (Masciale R. et al., 2015).



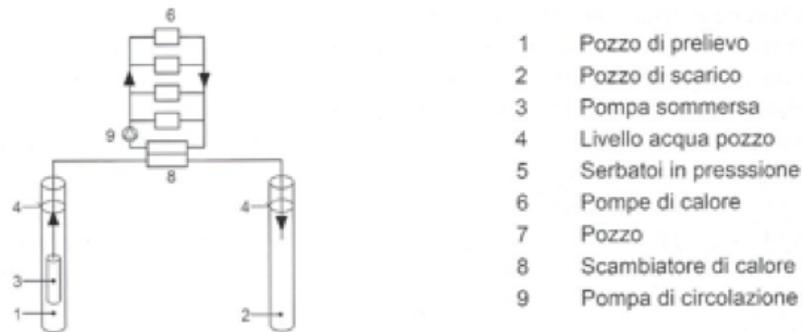


Figura 57. Configurazioni impiantistiche per gli impianti open-loop (Basta S. e Minchio F., 2008).

4.4 L'accumulo termico

Come sopra scritto, negli ultimi decenni l'incremento del fabbisogno energetico, insieme ad una crescente necessità nel contenere le emissioni di gas serra ed inquinanti, ha promosso una crescita delle tecnologie volte al risparmio energetico e alla produzione di energia da fonti rinnovabili. Le soluzioni per l'accumulo di energia costituiscono, tra queste, il più recente fronte d'interesse per la ricerca e la sperimentazione. In particolare l'accumulo di energia termica, spicca per versatilità e fattibilità economica, proponendo un gran numero di tecnologie, soluzioni e combinazioni con i vari impianti di produzione di energia già esistenti. Lo stoccaggio di energia termica o thermal energy storage (TES) e nel caso specifico del sottosuolo underground thermal energy storage (UTES) si articola principalmente in tre fasi: carico, stoccaggio e scarico (figura 58). La fase di carica, solitamente avviene durante la stagione estiva, dove il clima è molto caldo e l'energia termica viene assorbita da collettori solari o altri sistemi ed iniettata nel sottosuolo secondo varie tipologie di impianti geotermici. Il calore una volta stoccato nel sottosuolo può essere utilizzato nella stagione invernale, dove le temperature esterne sono rigide ed il fatto di avere una sorgente calda gratuita nel sottosuolo, costituisce un notevole vantaggio nella climatizzazione degli ambienti. È proprio l'estrazione di energia termica precedentemente accumulata che costituisce la fase di scarico.

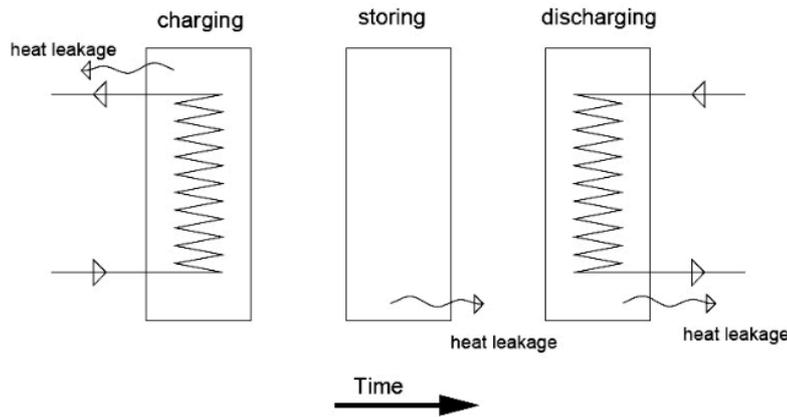
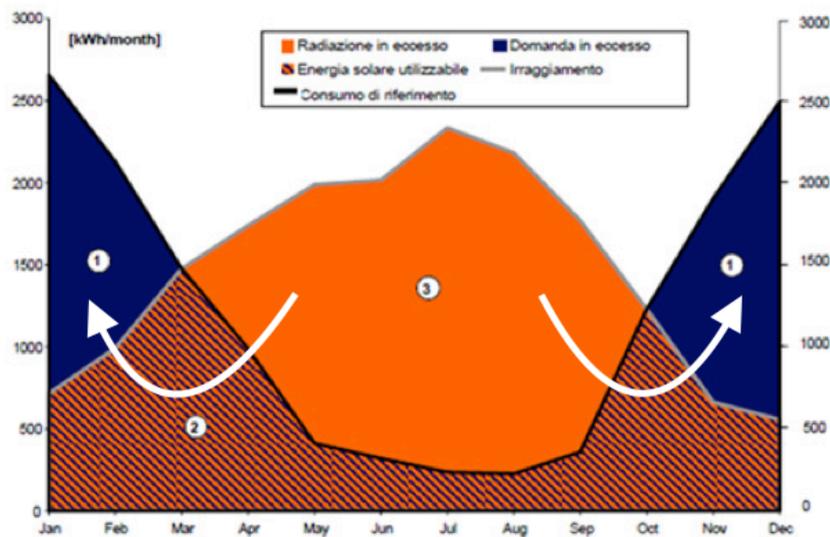


Figura 58. Fasi dell'accumulo termico (Musa M.L., 2010).

L'accumulo di calore si basa sul principio di raccogliere calore quando non serve, accumularlo ed utilizzarlo in altri periodi; questo significa traslare nel tempo l'offerta di energia, in quanto la massima energia termica la si ha disponibile in modo naturale nella stagione estiva, ma la necessità massima la si ha durante l'inverno (figura 59).



Fonte: ITW - Graz

Figura 59. La figura mostra la radiazione solare distribuita nell'arco dell'anno, accoppiata alla domanda di calore. Si nota come il picco massimo di radiazione sia in corrispondenza dei mesi estivi, mentre la domanda di calore è concentrata nei mesi invernali. Le frecce bianche illustrano la funzionalità dello storage termico, ovvero trasferire il calore in eccesso dall'estate all'inverno.

L'accumulo di energia termica può essere di tre tipologie: accumulo di calore termochimico, accumulo di calore sensibile e accumulo di calore latente. L'*Accumulo termochimico* (thermochemical energy storage) (Gil A. et al., 2010, Sharma A. et al., 2009) si basa sull'energia assorbita e rilasciata durante la rottura e la formazione dei legami molecolari all'interno di una reazione chimica reversibile.

L'*Accumulo di calore latente* (LHTES, latent heat thermal energy storage) (Gil A. et al., 2010, Sharma A. et al., 2009) sfrutta l'assorbimento o il rilascio di calore nel momento in cui il mezzo di stoccaggio subisce un cambiamento di fase, da solido a liquido o da liquido a gas e viceversa, senza significative variazioni della temperatura.

Infine, quello che maggiormente viene utilizzato è l'*accumulo di calore sensibile* (SHTES, sensible heat thermal energy storage) (Gil A. et al., 2010, Sharma A. et al., 2009) dove l'energia viene accumulata mediante la variazione della temperatura di un mezzo liquido (acqua, olio) o solido (roccia o sedimento non consolidato) senza alcun cambiamento di fase nell'intervallo di temperature del processo; quello che varia è quindi l'energia interna del mezzo accumulatore. L'accumulo termico nel sottosuolo può essere essenzialmente di tre tipologie: in acquifero, in caverna o nel terreno attraverso un campo sonde. L'*accumulo termico in acquifero* (ATES) (Dincer I. et al., 2002; Bauer D. et al., 2010; Amaya V. Novo et al., 2010; Wong B. et al., 2006; Kübler R. et al., 1997; Hasnsin S. M., 1998) sfrutta sistemi open loop, attraverso i quali inietta in acquifero l'acqua precedentemente riscaldata, che verrà estratta durante la stagione invernale ad una temperatura maggiore rispetto agli altri acquiferi (figura 60). Questo processo può utilizzare lo stesso acquifero, ne è un esempio Rostock in Germania, oppure acquiferi differenti dove l'acquifero "caldo" è il più profondo in modo da sfruttare anche il calore del gradiente geotermico (esempio il sistema di climatizzazione del parlamento tedesco).

I maggiori problemi da tenere in considerazione in fase di progettazione di questi sistemi per l'accumulo termico in acquifero, sono la distanza tra i due pozzi,

(prelievo e re-immissione) che deve essere sufficiente ad evitare la cortocircuitazione, il movimento di falda, il quale deve essere più immobile possibile per favorire lo stoccaggio di calore ed infine deve essere posta l'attenzione al fattore ambientale ovvero di non alterare troppo la fauna e flora degli acquiferi (Masciale R. et al., 2015). Gli acquiferi che si possono utilizzare possono essere naturali, chiaramente con portata abbondante, e acquiferi artificiali, realizzati appositamente per l'impianto.

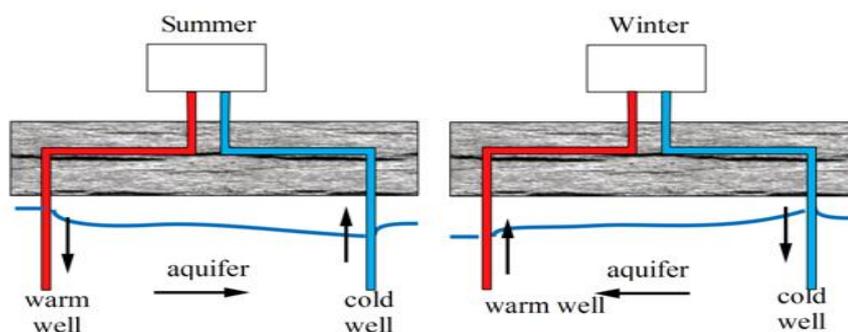


Figura 60. Schema del funzionamento di un sistema di accumulo termico in acquifero (Evans D. J. et al., 2006).

L'accumulo termico in caverna (CTES) (Dincer I. et al., 2002; Amaya V. Novo et al., 2010) (figura 61), sfrutta anch'esso sistemi open loop, posizionati in ex miniere, o caverne naturali sotterranee riempite d'acqua, ma attualmente costituisce un cattivo investimento per i costi di sfruttamento troppo elevati.

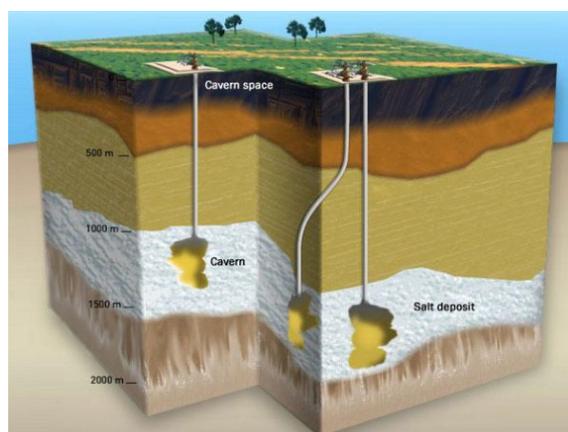


Figura 61. Schema di un accumulo termico in caverna.

L'accumulo termico nel terreno mediante sonde geotermiche (BTES) (Bauer D. et al, 2010; Amaya V. Novo et al, 2010; Wong B. et al, 2006) sfrutta chiaramente sistemi close loop ed è una pratica molto diffusa. Si tratta di realizzare un campo sonde infisse nel terreno, adeguatamente coibentate, che diffondono calore dal fluido termovettore interno alla sonda al terreno circostante. Queste sonde sono poste una vicina all'altra, ai fini di simulare un vero e proprio scambiatore di calore (figura 62).

Come gli altri sistemi di accumulo, si tratta di un accumulo stagionale, ovvero un fase di carica nella stagione estiva, e scarica durante l'inverno. Il problema principale è che spesso il calore estratto durante l'inverno è maggiore di quello assorbito durante l'estate, e a medio lungo termine l'utilizzo di questi impianti potrebbe provocare un raffreddamento del sottosuolo. Una possibile soluzione a questo problema è realizzare un campo sonde dove le sonde funzionano in modo alternato, quindi funzionano a "settori" in modo da poter rigenerare la temperatura iniziale (Danielewicz J. et al, 2013).

Gli impianti di stoccaggio di calore mediante sonde geotermiche sono svariati come Okostoks in Canada, Neckarlsum in Germania, Ikea di Rimini in Italia e molti altri ancora.

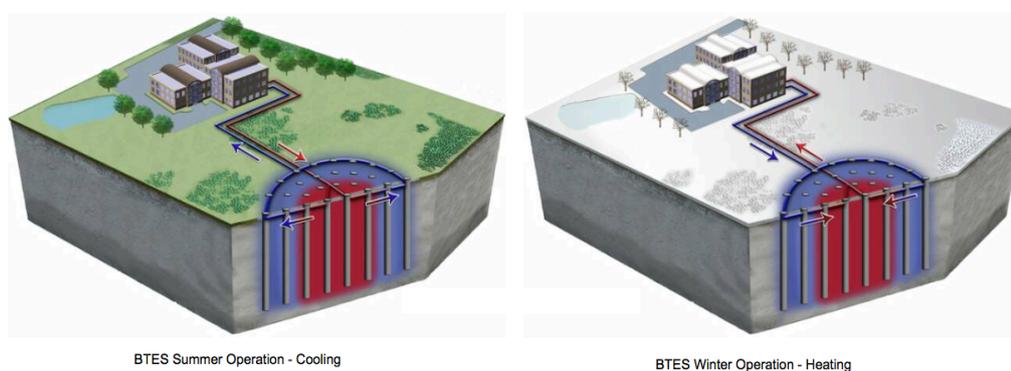


Figura 62. Schema di funzionamento di una sistema di accumulo a sonde geotermiche verticali (fonte "Underground Energy LLC").

Sia per quanto riguarda sistemi di accumulo open loop che close loop è importante che il sottosuolo abbia delle caratteristiche idonee a questo tipo di sfruttamento. Innanzitutto è necessario valutare se le temperature di un ciclo (carica e scarica) siano non troppo differenti, altrimenti il sottosuolo subirebbe degli squilibri termici in tempi troppo brevi, e ciò sarebbe dannoso per l'ambiente e per il sistema. Inoltre, per i sistemi open loop, come sopra scritto, bisogna valutare attentamente il problema della cortocircuitazione e del movimento di falda in aggiunta alla permeabilità e la porosità dell'acquifero, entrambe con valori più elevati possibile. Infine rivestono un ruolo fondamentale le proprietà termiche dei materiali quali, conducibilità termica, capacità termica e diffusività termica.

La conducibilità termica è la capacità di un materiale a trasmettere calore e si misura in W/mK ed è definita come la quantità di calore che fluisce in un'unità di tempo attraverso un'area unitaria di un determinato materiale a causa della formazione di un gradiente unitario; questa aumenta notevolmente con il crescere del contenuto di acqua, varia anche in funzione della mineralogia del materiale, ma in caso di accumulo di calore è necessario un valore più basso possibile. La capacità termica invece è la quantità di calore (J) che bisogna cedere o togliere ad un volume unitario (m^3) di una sostanza per innalzarne o diminuirne la temperatura di 1 K [J/m^3K]; anche questa aumenta con il contenuto d'acqua, ma a differenza della conducibilità termica in caso di accumulo si richiede un valore alto.

In ultimo, la diffusività termica è la velocità con cui il calore si trasmette che si misura in m^2/s ed è definita come l'inerzia termica di un materiale, descritta come il rapporto fra conducibilità termica e il prodotto di densità e calore specifico del corpo oggetto di studio; per l'accumulo termico serve un valore medio-basso.

5. I parametri per la valutazione geotermica

In ottica geotermica, il sottosuolo può essere definito come un volume di materiale, di varia natura, con diverse fisiche e termiche. E' importante quindi individuare e determinare queste caratteristiche nelle aree oggetto di studio al fine di realizzare una valutazione geotermica e delle mappe che esprimano l'idoneità del sottosuolo allo scambi termico, in termini di sistemi geotermici a circuito aperto o chiuso. Al fine di arrivare a questi risultati è stata necessaria una prima fase di indagine e raccolta dati nelle aree oggetto di studio (Johannesburg, Durban e Cape Town) fondamentali per la realizzazione del lavoro. Le proprietà rilevanti del sottosuolo che interessa conoscere per la caratterizzazione geotermica possono essere racchiuse in tre categorie: mineralogico-petrografiche, idrogeologiche e termofisiche. Le prime due classi sono state trattate in dettaglio nel secondo capitolo quando si sono caratterizzate le aree d'interesse dal punto di vista litologico e idrogeologico, mentre per quando riguarda le proprietà termo-fisiche ci sarà in seguito una sezione dedicata. Al fine della caratterizzazione geotermica è quindi necessario definire delle porzioni di sottosuolo (quello più superficiale) caratterizzate da analoghe caratteristiche competenti ai processi di scambio termico e valutarne l'idoneità; realizzando così un "modello di geo-scambio del sottosuolo" basato sugli aspetti geo-idrologici delle aree in esame. La valutazione dell'idoneità geotermica consiste nella caratterizzazione dei volumi precedentemente definiti con i parametri sopra elencati, idonei o meno al geo-scambio e nell'integrazione di questi, con dati di campagna raccolti nella fase esplorativa. Il prodotto deve essere una suddivisione delle aree di studio in sotto insiemi che, in funzione dei parametri sopra scritti, esprimano il grado di idoneità allo scambio termico sia per quanto riguarda sistemi open loop che close loop.

La definizione del sottosuolo delle aree oggetto di studio necessita di una serie di processi di elaborazione e semplificazione, in quanto i dati derivano da fonti differenti che non sempre risultano perfettamente compatibili ed inoltre le informazioni sono di varia natura (geologia, idrogeologia, geotermica, geochimica,

geotecnica), dunque in seguito si affronterà quali parametri e come sono stati presi in considerazione ai fini del risultato. La caratterizzazione del sottosuolo, che si utilizzerà per redare le carte di idoneità allo scambio termico, rappresenta l'integrazione di informazioni di diversa natura e provenienza che, come tali, verranno normalizzate e omogeneizzate. Questa fase prevede la creazione di una corrispondenza tra unità litologiche e unità caratterizzate da parametri fisici, termici e idrogeologici in funzione dell'elaborato desiderato.

5.1 Stato dell'arte

Considerato il notevole incremento dell'uso di energie rinnovabili, sia per la produzione di energia elettrica che per la generazione di calore, questo studio risulta di grande valenza per la diffusione nel mondo delle nuove tecnologie energetiche. Nel caso in esame si vuole realizzare una mappatura di alcune aree in Sudafrica e valutarne l'idoneità all'utilizzo di sistemi geotermici di bassa entalpia; tali tecnologie utilizzate per la climatizzazione di edifici sono inoltre sensibili al nostro Pianeta, visto che determinano una notevole riduzione dei combustibili fossili (Bayer et al., 2012; Nam Y. et al., 2011). I sistemi geotermici di bassa entalpia come trattato nel capitolo precedente si suddividono in sistemi a circuito aperto, che sfruttano acqua di falda per lo scambio termico e sistemi a circuito chiuso, i quali si servono di sonde poste nel sottosuolo. Entrambi i sistemi trovano sempre più applicazione e diffusione, visto che negli ultimi anni risultano essere sempre più facili da installare e meno onerosi soprattutto nella climatizzazione di edifici ad uso residenziale in quanto molto diffusi (Ondreka J. et al., 2007; Busby J. et al., 2009).

Considerato il continuo aumento d'interesse verso tali tecnologie da parte dei vari Paesi, negli ultimi anni sono stati svolti svariati studi per valutare l'idoneità del sottosuolo all'utilizzo di sistemi geotermici di bassa entalpia. E' stato visto che la loro efficienza oltre che alle proprietà fisiche del sottosuolo, varia in funzione delle condizioni climatiche, e che climi temperati sono considerati i migliori in

quanto il sottosuolo possiede una temperatura che è un punto d'incontro tra le temperature massime estive e le minime invernali (Zarrella et al. 2013). Vari autori hanno proposto dei metodi per valutare l'idoneità del sottosuolo allo scambio termico valutando inoltre il potenziale di geo-scambio per aree dalle condizioni geologiche simili a quelle delle aree studiate in questa tesi (Galgaro A. et al., 2015; Garcia-Gal A. et al., 2015; Noorollahi Y. et al., 2008; Ondreka J. et al., 2007). In altri lavori sono stati svolti studi simili dove però, la differenza principale è il flusso di calore nel senso che si sono svolte valutazioni del potenziale geotermico in aree con forti anomalie geotermiche (Noorollahi Y. et al., 2007; Tufekci N. et al., 2010).

La valutazione dell'idoneità del sottosuolo all'utilizzo di sistemi geotermici di bassa entalpia, si articola principalmente in due fasi (Hamada Y. et al., 2002): la selezione e classificazione dei parametri da utilizzare e, l'integrazione di questi in mappe tematiche di geo-scambio attraverso sistemi informatici come GIS. I parametri normalmente utilizzati nei lavori sopra citati sono di natura geologica, idrogeologica, geofisica e termo-fisica. Tali parametri vengono classificati in funzione della loro attitudine allo scambio termico, per la realizzazione delle mappe del potenziale o di idoneità al geo-scambio che possono essere per sistemi open e close-loop. Generalmente vengono eseguite delle carte tematiche per ogni parametro cartografabile (conducibilità termica, profondità della falda ecc.) e valutazioni descrittive per i parametri non cartografabili. Infine, mediante processi d'interpolazioni e contouring dei parametri sopra scritti, attraverso il sistema informatico GIS (Geographic information system) vengono realizzate le mappe di idoneità allo scambio termico. Non tutti i lavori adottano gli stessi parametri, oppure vengono classificati in modo differente ottenendo così mappe diverse, ma chiaramente ogni metodo proposto esprime carte tematiche o stime del potenziale di geo-scambio in funzione del risultato da voler raggiungere. Considerato lo stato dell'arte sulla mappatura del sottosuolo per la geotermica di bassa entalpia, nel lavoro oggetto di questa tesi si propone un approccio puramente geologico per la realizzazione di mappe tematiche di sintesi, che esprimano l'idoneità del sottosuolo all'utilizzo di sistemi geotermici di bassa

entalpia. Di seguito verranno trattati i parametri considerati per la realizzazione dei due elaborati grafici proposti, ovvero la mappa tematica che esprima l' idoneità del sottosuolo all' utilizzo di sistemi geotermici superficiali a circuito aperto e quella per sistemi a circuito chiuso.

5.2 La cartografia: i parametri

Al fine di realizzare una cartografia significativa sulla risorsa geotermica di bassa entalpia, è necessario identificare quei parametri che caratterizzano il comportamento del sottosuolo dal punto di vista della capacità di scambio termico (Hamada Y. et al., 2002; Gale I., 2005; Noorollahi Y. et al.; ; Garcia-Gal A. et al., 2015; Botteghi S. et al., 2013). Tali parametri, ricavati a partire da quanto riportato nei capitoli precedenti, sono sintetizzati, secondo quanto segue:

- *Proprietà geologiche-tecniche*, come la litologia, la tessitura e la durezza dei materiali ricavate da fonti bibliografiche e affrontate in dettaglio nel secondo capitolo;
- *Proprietà idrogeologiche*, quali profondità della prima falda, rendimento degli acquiferi, e geochimica delle acque;
- *Proprietà termo-fisiche*, come la conducibilità termica del sottosuolo (stimata da dati bibliografici su base petrografica):
- *Flusso di calore geotermico e Temperature medie del sottosuolo*, inteso sia come terreno-roccia o come acqua di falda.

5.2.1 Proprietà geologiche

Al fine di realizzare carte tematiche che esprimano l' idoneità del sottosuolo allo scambio termico, è importante caratterizzare e classificare le aree oggetto di studio dal punto di vista litologico e/o tessiturale (Gale I., 2005; Noorollahi Y. et al.; Botteghi S. et al., 2013; Galgaro A. et al., 2015; Busby J. et al., 2009; Ondreka

J. et al., 2007; Gemelli A. et al., 2011).

La classificazione geologica è importante principalmente per sistemi geotermici close loop, i quali sfruttano uno scambio termico direttamente con la roccia o terreno del sottosuolo, e quindi in funzione della litologia, o sedimento sciolto si hanno differenti proprietà termo-fisiche, idonee o meno allo scambio termico. È già stato affrontato un capitolo sul tematismo della geologia ed idrogeologia, ma in questo paragrafo si vuole sintetizzare quanto scritto al capitolo 3 estrapolando solamente il dato litologico-tecnico, redando così una tabella che associ al nome della formazione geologica la corrispondente litologia in modo da avere disponibile questa informazione in modo chiaro e sintetico. Oltre alla litologia, verrà riportata anche la durezza delle rocce, in quanto può dare un'indicazione sul costo di perforazione: maggiore è la durezza e maggiore è il costo di perforazione. Nel prossimo capitolo quindi, anche la durezza sarà uno dei parametri che determinerà l'idoneità del sottosuolo all'utilizzo di sistemi geotermici di bassa entalpia. La durezza delle rocce è in funzione della durezza in scala di Mohs dei minerali che la compongono, e i valori attribuiti in tabella sono stati presi secondo la norma UNI 8458/1983, la quale classifica tutti tutte le tipologie di lapidei.

Il processo di classificazione per la redazione di tabelle significative riguarda chiaramente le tre aree d'interesse ovvero le zone di Johannesburg-Pretoria, Durban e Cape Town; per ogni area viene riportata la carta geologica con relativa legenda e seguita dalla tabella di classificazione. Le carte geologiche sono state realizzate mediante il sistema informatico GIS (Geographic Information System), attraverso un processo di sintesi e unione di vari elaborati disponibili in "*An Explanation of the 1:500000 General Hydrogeological Map*" delle aree oggetto di studio.

CARTA GEOLOGICA DELL'AREA DI JOHANNESBURG

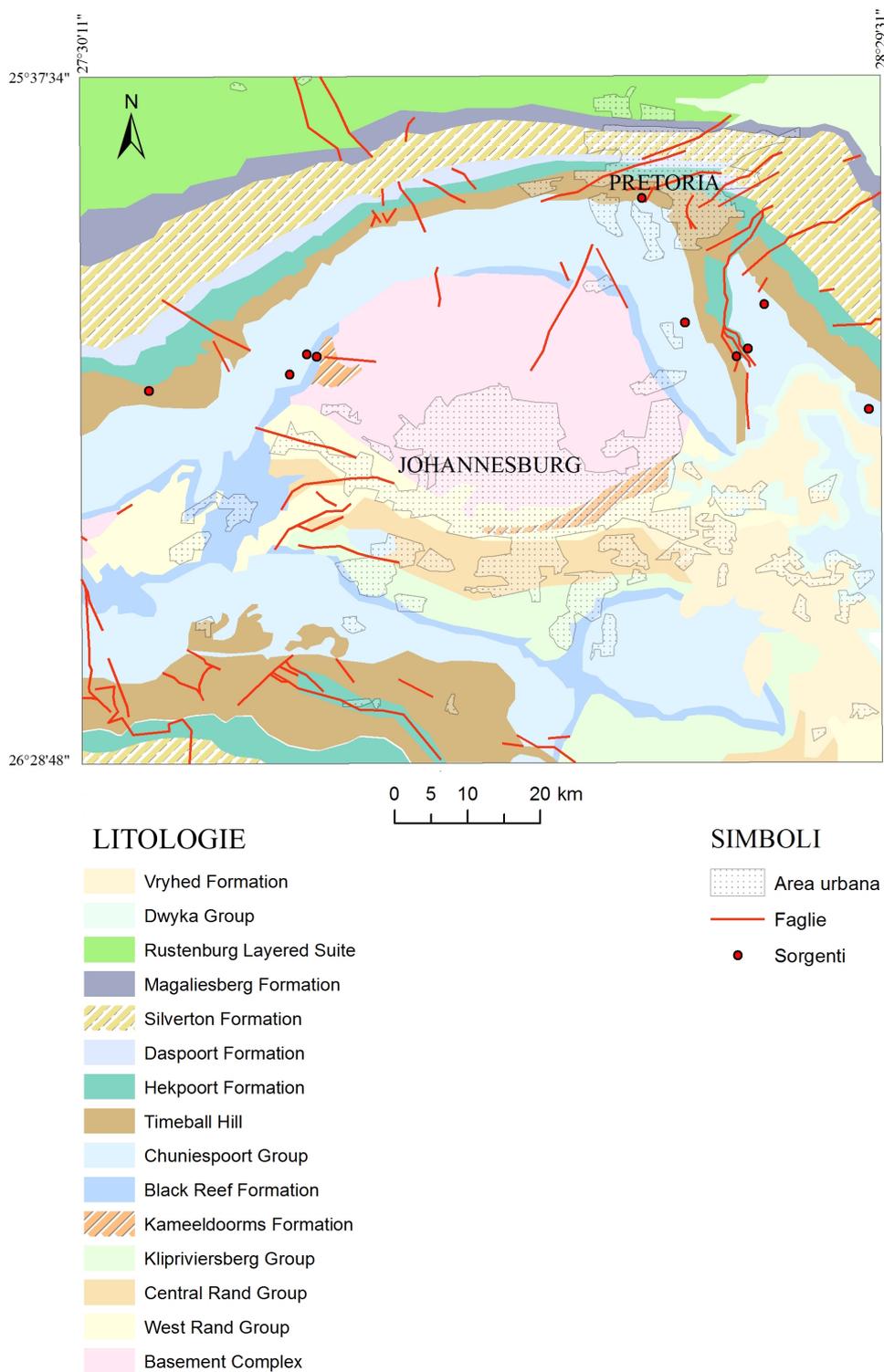


Figura 63. Carta geologica della zona di Johannesburg.

FORMAZIONE GEOLOGICA	LITOLOGIA	DUREZZA
Vryhed Formation	Arenaria-argillite	3-4
Dwyka Group	Tillite	3-4
Rustenburg Layered Suite	Gabbro	6-7
Magaliesberg Formation	Quarzite	7
Silverton Formation	Argillite	3-4
Daspoort Formation	Quarzite-Arenaria a grana fine	5
Hekpoort Formation	Andesite	6-7
Timeball Hill	Quarzite-Argillite	5
Chuniespoort Group	Dolomia	3-4
Black Reef Formation	Quarzite-Conglomerato-Argillite	4,5
Kameeldoorns Formation	Breccia-Conglomerato	3-4
Klipriviersberg Group	Andesite-Tufo	
Central Rand Group	Arenaria	3-4
West Rand Group	Quarzite-Argillite-Conglomerato	4,5
Basement Complex	Granito	6-7

Tabella 18. Litologia e durezza delle rocce (Johannesburg). La tabella associa ad ogni Formazione geologica dell'area di Johannesburg la relativa litologia e durezza della roccia secondo la scala di Mohs dei minerali. Le informazioni sulle litologie derivano da lavori precedentemente citati.

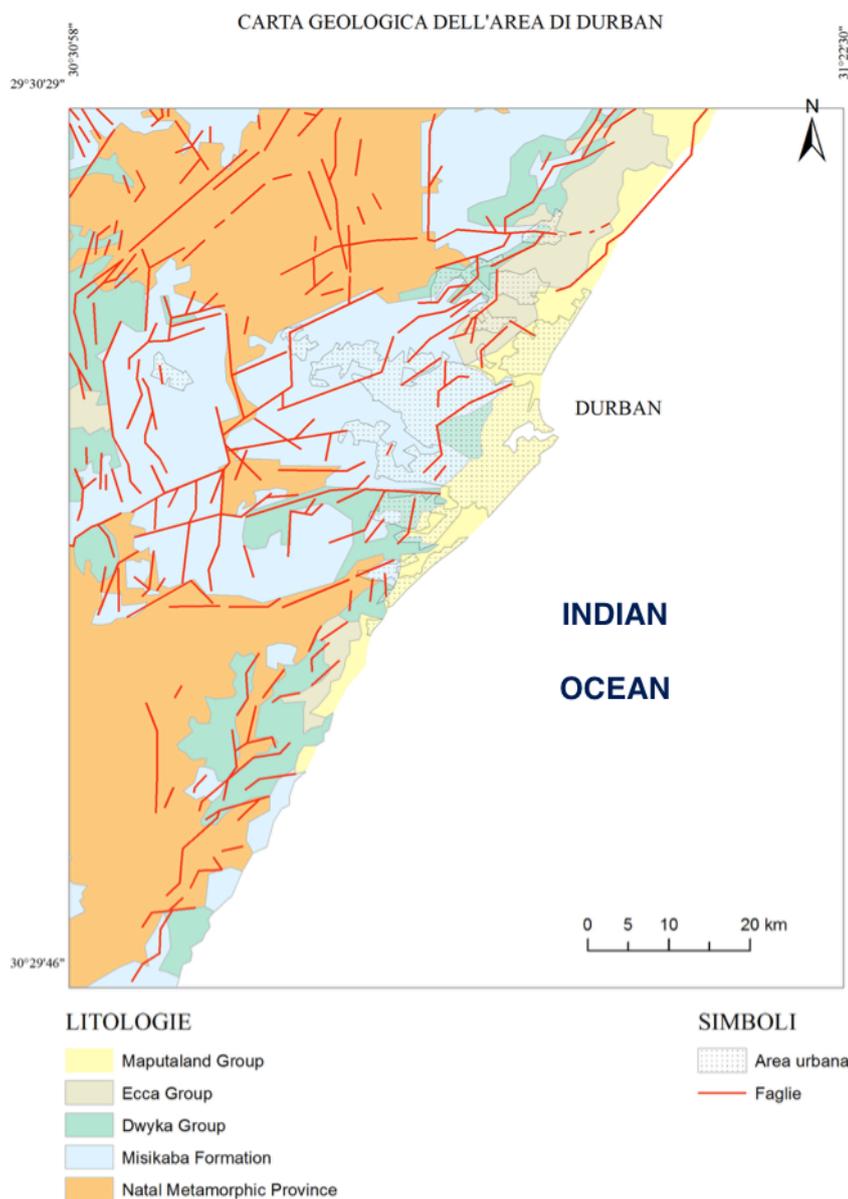


Figura 64. Carta geologica della zona di Durban.

FORMAZIONE GEOLOGICA	LITOLOGIA	DUREZZA
Maputaland Group	Sabbia-Argilla-Silt	0
Eccca Group	Argillite-Arenaria	3-4
Dwyka Group	Tillite	3-4
Misikaba Formation	Quarzite-Argillite	5
Natal Metamorphic Province	Granito-Gneiss	6-7

Tabella 19. Litologia e durezza delle rocce (Durban). La tabella associa ad ogni Formazione la relativa litologia e durezza della roccia.

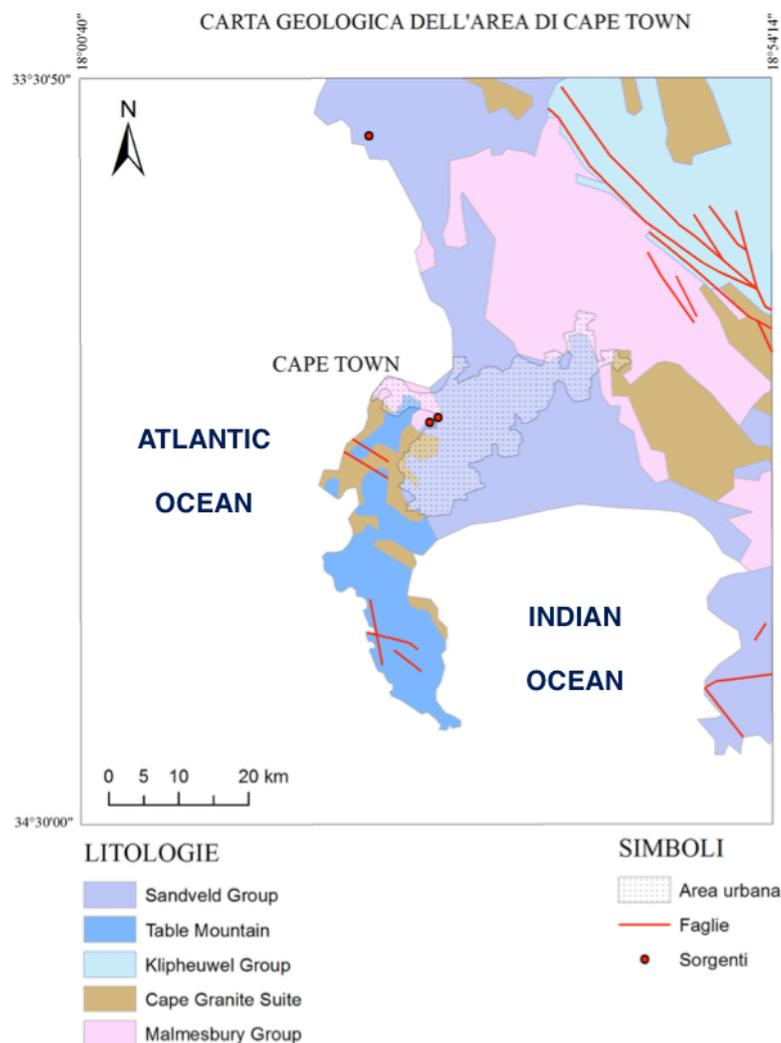


Figura 65. Carta geologica della zona di Cape Town.

FORMAZIONE GEOLOGICA	LITOLOGIA	DUREZZA
Sanveld Group	Sabbia	0
Table Mountain	Arenaria	3-4
Klipuwel Group	Conglomerato- Arenaria-Argillite	3-4
Cape Granite Suite	Granito	6-7
Malmesbury Group	Arenaria a grana fine	3-4

Tabella 20. Litologia e durezza delle rocce (Cape Town). La tabella associa ad ogni Formazione geologica dell'area di Cape Town la relativa litologia e durezza della roccia secondo la scala di Mohs dei minerali. Le informazioni relative alle litologie derivano da lavori precedentemente citati.

5.2.2- Proprietà idrogeologiche

Un secondo fattore da considerare al fine di realizzare carte tematiche che esprimano l'idoneità allo scambio termico, è una caratterizzazione idrogeologica dell'area (Gale I., 2005; Botteghi S. et al., 2013; Garcia-Gal A. et al., 2015; Hamada Y. Et al., 2002; Schillereff H. S., 2008; Busby J. et al., 2009). La classificazione in termini idrogeologici è fondamentale per sistemi geotermici open loop, i quali sfruttano l'acqua di falda come mezzo di scambio termico tra sottosuolo e impianto di climatizzazione, posto in superficie. In questo paragrafo si vogliono sintetizzare quelli che sono gli aspetti idrogeologici da considerare per realizzare una carta tematica sull'idoneità del sottosuolo allo scambio termico all'utilizzo di sistemi geotermici a circuito aperto. Le informazioni idrogeologiche che si andranno a considerare sono scritte in dettaglio al capitolo 3, ma in questa fase si intende sintetizzare quanto già scritto, estrapolando in modo chiaro e sintetico i parametri idrogeologici utili al fine sopra scritto. I parametri che si sono presi in considerazione al fine della caratterizzazione idrogeologica sono il rendimento dell'acquifero, profondità della prima falda, idoneità geochimica e tipologia di acquifero. Il processo di classificazione idrogeologica è stato eseguito per le tre aree d'interesse ovvero le zone di Johannesburg-Pretoria, Durban e Cape Town; per ogni area viene riportata tabella di classificazione con i parametri sopra elencati. Nella tabelle non viene riportato il parametro sull'idoneità geochimica in quanto, dai dati disponibili, le acque di questi acquiferi risultano idonee a quasi tutti gli usi, compreso l'uso domestico e potabile, quindi si assume che tutti gli acquiferi risultino *idonei* dal punto di vista geochimico all'uso di sistemi open loop. Per quando riguarda la profondità della prima falda, vengono di seguito riportate delle mappe relative alle tre aree di studio che descrivono tale parametro. I rendimenti degli acquiferi sono riportati della carte idrogeologiche delle aree di Johannesburg, Durban e Cape Town al capitolo 3 rispettivamente nelle figure 10, 30 e 42. I dati utilizzati derivano da un processo di sintesi e unione di vari elaborati e tabelle

disponibili in “*An Explanation of the 1:500000 General Hydrogeological Map*” delle aree oggetto di studio.

JOHANNESBURG AREA

FORMAZIONE GEOLOGICA	TIPOLOGIA ACQUIFERO
Vryhed Formation	intergranulare- fratturato
Dwyka Group	intergranulare- fratturato
Rustenburg Layered Suite	intergranulare- fratturato
Magaliesberg Formation	fratturato
Silverton Formation	intergranulare- fratturato
Daspoort Formation	fratturato
Hekpoort Formation	intergranulare- fratturato
Timeball Hill	intergranulare- fratturato
Chuniespoort Group	carsico
Black Reef Formation	fratturato
Kameeldoorns Formation	fratturato
Klipriviersberg Group	intergranulare- fratturato
Central Rand Group	fratturato
West Rand Group	fratturato
Basement Complex	intergranulare- fratturato

Tabella 21. La tabella illustra la tipologia di acquifero per ogni formazione geologica dell'area di Johannesburg.

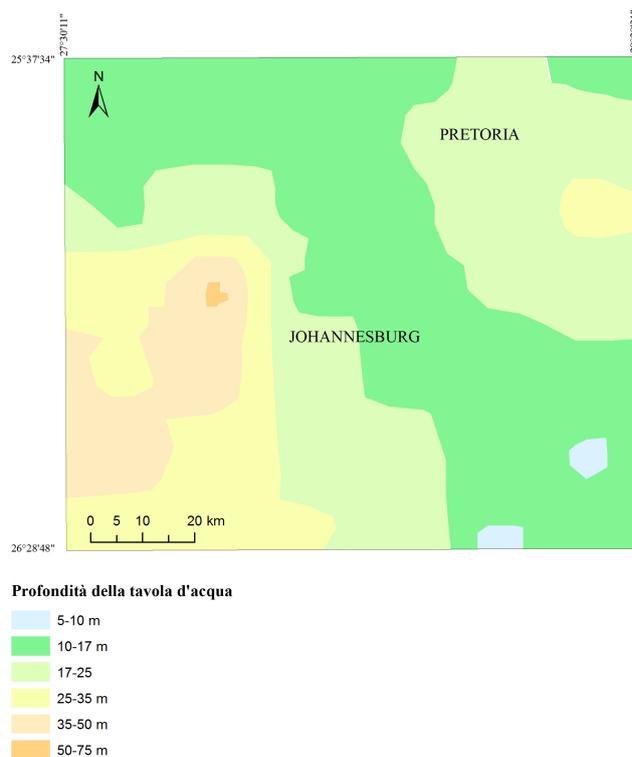


Figura 66. Mappa della profondità della tavola d'acqua della zona di Johannesburg.

DURBAN

FORMAZIONE GEOLOGICA	TIPOLOGIA ACQUIFERO
Maputaland Group	intergranulare
Ecca Group	intergranulare- fratturato
Dwyka Group	fratturato
Misikaba Formation	fratturato
Natal Metamorphic Province	intergranulare- fratturato

Tabella 22. La tabella illustra la tipologia di acquifero per ogni formazione geologica dell'area di Durban.

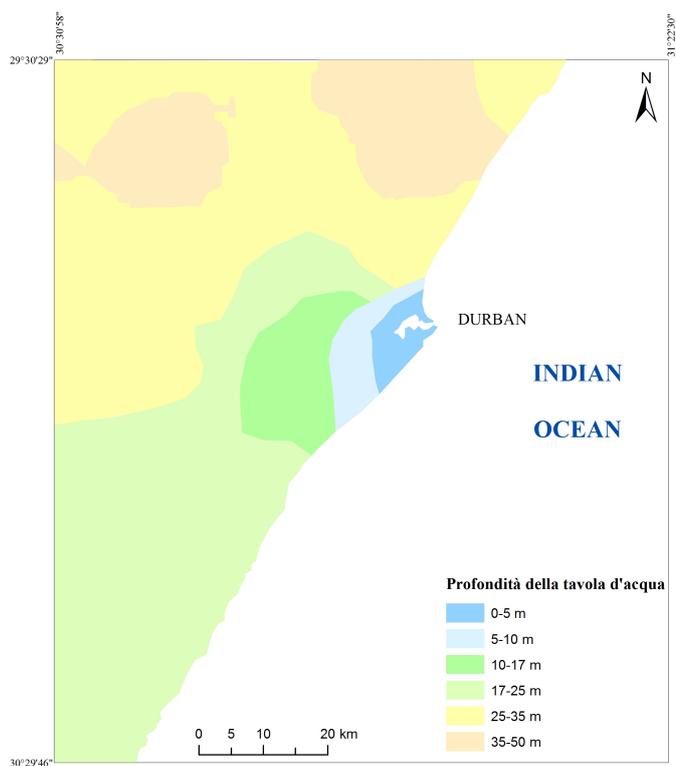


Figura 67. Mappa della profondità della tavola d'acqua della zona di Durban.

CAPE TOWN

FORMAZIONE GEOLOGICA	TIPOLOGIA ACQUIFERO
Sanveld Group	intergranulare
Table Mountain	fratturato
Klipuwel Group	fratturato
Cape Granite Suite	Intergranulare-fratturato
Malmesbury Group	fratturato

Tabella 23. La tabella illustra la tipologia di acquifero per ogni formazione geologica dell'area di Cape Town.

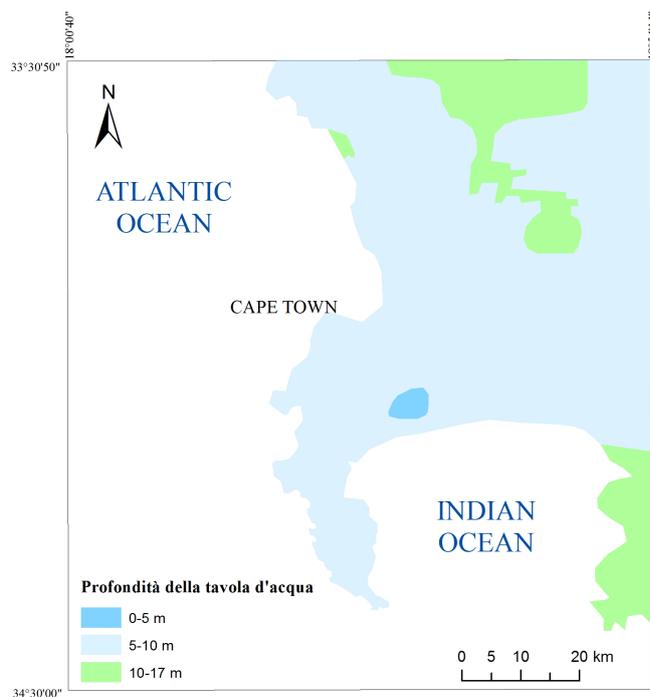


Figura 68. *Mapa della profondità della tavola d'acqua della zona di Cape Town.*

Analizzando e sintetizzando quanto riportato nelle tabelle e nelle mappe al fine di definire ed uniformare quanto più possibile i parametri idrogeologici da applicare alle carte sull'idoneità del sottosuolo allo scambio termico si sono fatte le seguenti assunzioni:

- per la realizzazione della carta tematica per sistemi open loop si è assunto di raggruppare i *rendimenti degli acquiferi* in 3 classi: rendimento minore di 0,5 come condizione *non favorevole* in quanto presenta una quantità di risorsa idrica troppo esigua, rendimento compreso tra 0,5 e 2l/s come *mediamente favorevole*, rendimento maggiore di 2l/s come *favorevole*.

RENDIMENTO (l/s)	CLASSI
>0,5	Non favorevole
>0,5<2	Mediamente favorevole
>2	Favorevole

- Le *profondità della prima falda* per tutte le aree oggetto di studio risultano piuttosto superficiali e verranno suddivise in classi d' idoneità nel prossimo capitolo;
- Infine per quanto riguarda la *geochimica delle acque* risultano tutte *idonee* a quasi tutti gli utilizzi, compreso lo sfruttamento per sistemi geotermici di bassa entalpia.

Nel prossimo capitolo, a questi parametri verrà assegnato un punteggio in funzione del grado d' idoneità, per realizzare delle classi di valori, che esprimano la predisposizione o meno del sottosuolo ad ospitare sistemi open loop.

5.2.3-Proprietà termo-fisiche

In questa sezione vengono presentati i parametri termici e fisici del terreno, da considerare per una valutazione sullo scambio termico del sottosuolo. I parametri che influenzano lo scambio termico sono: conduttività termica, densità, capacità termica e diffusività termica del sottosuolo. Gli aspetti sopra elencati vengono introdotti per un duplice scopo: sia per la realizzazione delle mappe di scambio termico, sia perché sono fondamentali per una valutazione sull'accumulo termico. Per quanto riguarda l'accumulo termico è importante definire quelli che sono gli aspetti termo-fisici del materiale di accumulo per garantire una buona efficienza del sistema. Dal punto di vista termico il terreno è suddiviso in due strati principali utilizzati per lo geo-scambio:

- *strato termicamente instabile*, prevalentemente sfruttato da sistemi di scambio close loop a configurazione orizzontale;
- *strato termicamente stabile*, prevalentemente utilizzato dai sistemi di scambio close loop a sviluppo verticale, ovvero le sonde geotermiche.

Lo strato termicamente instabile è la porzione di sottosuolo dove la temperatura non è costante, in quanto influenzata dalle fluttuazioni climatiche atmosferiche, mentre lo strato termicamente stabile è la porzione di sottosuolo la cui temperatura non risente dalle fluttuazioni climatiche, ma dipende principalmente dal flusso geotermico e dalla presenza di falde sotterranee, anche se in situazioni geotermiche normali lo si può considerare a temperatura costante (temperatura indisturbata del sottosuolo) fino a circa 100m di profondità. In entrambi gli strati le condizioni termiche del terreno possono essere alterate dalla presenza dell'acqua di falda, la quale, in relazione della sua velocità di scorrimento, può influire sulla capacità di scambio termico e sulla capacità di accumulo energetico (energy storage). Come sopra accennato, la temperatura dello strato termicamente stabile, che generalmente corrisponde anche alla temperatura dell'acqua di falda, si può calcolare come il valore della media annuale delle temperature dell'aria esterna, salvo casi di anomalie geotermiche come zone termali, vulcaniche, di rift, dove il valore della media annuale delle temperature dell'aria esterna differisce dal valore di temperatura media nel terreno. Generalmente, il valore di temperatura nello strato stabile aumenta in funzione della profondità secondo un gradiente geotermico mediamente pari a 30 °C/km ma che verrà trattato in dettaglio nella prossima sezione. Le proprietà termo-fisiche del sottosuolo possono essere determinate in fase preliminare mediante indagine geologica, idrogeologica e climatica ed una raccolta dati su base bibliografica nell'area oggetto di studio, come in questo lavoro. Successivamente, tali valutazioni potranno essere confermate e/o validate in fase applicativa validate con un test di risposta termica (il cosiddetto GRT “ground response test”).

Le proprietà del sottosuolo ai fini di questo lavoro riguardano la conduttività termica, la densità, la capacità termica e la diffusività termica del terreno. La *conducibilità o conduttività termica (thermal conductivity o heat conductivity)* rappresenta l'attitudine di un materiale a trasmettere calore. Essa dipende dal materiale in esame ed è espressa nel Sistema Internazionale in W/mK. Il simbolo utilizzato è λ . Nel campo della geotermia è un valore molto rappresentativo, in

quanto fornisce informazioni sull'efficienza che potrà avere il sistema oggetto di studio e sui criteri di progettazione di questo. Una corretta valutazione di tale parametro è essenziale per ottimizzare il costo di un impianto geotermico. I valori di conducibilità dei materiali naturali variano generalmente in un intervallo compreso tra poco più di 0 e 10 W/mK a seconda del tipo di roccia, composizione mineralogica, porosità, struttura e tessitura del materiale, grado di saturazione. La conducibilità termica, come sopra scritto può variare secondo numerosi fattori, infatti considerando il tipo di roccia si può dire che in alcune rocce è, con buona approssimazione, isotropa, in particolare nelle rocce vulcaniche e plutoniche. Al contrario, la conducibilità termica di molte rocce sedimentarie e metamorfiche è decisamente anisotropa. La conducibilità termica di minerali e rocce decresce con il crescere della temperatura, infatti, da dati bibliografici (Clauser C., 2011; Robertson E. C., 1988), si possono definire le seguenti variazioni di conducibilità termica in funzione della temperatura per le diverse litologie:

- *Rocce sedimentarie*: fino a 300°C si ha una riduzione di un fattore circa a due, mentre oltre 300°C la diminuzione della conducibilità termica cala, ma risulta più accentuata in sedimenti di origine chimica rispetto a quelli di origine fisica;

- *Rocce vulcaniche*: varia da caso a caso con la temperatura e in funzione della loro opacità, per esempio vetri vulcanici e rocce con ridotto contenuto di ferro presentano un aumento di conducibilità termica per temperature superiori a 800 - 1000 °C;

- *Rocce intrusive*: a temperature superiori a 600 °C la conducibilità termica decresce molto poco. In tali rocce la variazione di conducibilità termica è legata al contenuto in feldspati: per rocce ricche in feldspati la conducibilità termica decresce di poco oltre 300 °C, mentre per rocce povere in feldspati la decrescita è notevole;

- *Rocce metamorfiche*: la diminuzione della conducibilità termica con la temperatura dipende dal contenuto di una fase minerale dominante, similmente alle rocce intrusive. Per le quarziti, la diminuzione è importante fino a circa 500°C,

mentre per le rocce povere in quarzo la diminuzione della conducibilità termica è lieve.

Una seconda proprietà fisica che ha importanti ripercussioni se associata alla conducibilità termica è la pressione, la quale ha effetti differenti a seconda del suo valore (Robertson E.C.,1988): aumentando la pressione dei micro-cracks nella roccia, questi tendono a chiudersi riducendo così la resistenza di contatto termico. Questo fenomeno si ha per pressioni inferiori a 15 MPa, mentre un aumento di pressione fino a 40MPa non comporta effetti rilevanti sulla conducibilità termica, ed in ultimo per pressioni maggiori di 40MPa si ha la riduzione della porosità, con un incremento del 10% della conducibilità termica. Oltre che con temperatura e pressione la conducibilità termica varia anche con porosità, fluidi di poro, saturazione, fase minerale dominante, anisotropia. Si può concludere dicendo che nelle rocce sedimentarie la conducibilità termica è controllata principalmente da porosità e tipologia di sedimento. Anche in quelle vulcaniche la porosità è il fattore maggiormente influenzante. Rocce intrusive e metamorfiche sono in genere meno porose: il fattore più rilevante è la fase minerale dominante: contenuto in feldspati per le rocce intrusive, contenuto in quarzo per quelle metamorfiche.

Il secondo parametro che si andrà a descrivere è la *densità* ρ , che è definita come il rapporto tra la massa m ed il volume V di un materiale dove l'unità di misura secondo il SI è kg/m^3 :

$$\rho = \frac{m}{V}$$

Viste le svariate tipologie di roccia, è necessario distinguere diversi tipi di densità:

- ρ , densità di massa ovvero la densità media del volume di roccia considerato compresi pori e fratture;
- ρ_i , densità di ciascun minerale componente la roccia;
- ρ_{ma} , densità media della matrice solida detta anche densità granulare dove si considera solo la parte solida (minerali, grani, cemento).

- ρ_{fl} , densità media dei fluidi di poro, per esempio la densità dell'acqua ρ_w .

La *densità di massa* di una roccia di n componenti è espressa dalla seguente relazione:

$$\sum_{i=1}^n \rho_i * V_i$$

dove V_i è la frazione di volume della componente i e ρ_i la densità di ogni singolo minerale. Nel caso di roccia porosa, come nella maggior parte dei casi, la frazione di volume dei pori è espressa come porosità totale ϕ e la precedente equazione diventa:

$$\rho = (1 - \phi)\rho_{ma} + \phi\rho_{fl}$$

La *densità dei minerali* è controllata dalla loro composizione chimica, tipo di legami e struttura. Il range di densità per i principali minerali presenti nelle rocce è $2.2 * 10^3 - 3.5 * 10^3 \text{ kg/m}^3$. Le rocce ignee presentano un aumento della densità al passaggio da composizioni acide a basiche. Rocce porose mostrano una diminuzione di densità all'aumento della porosità e al decremento della saturazione d'acqua. La densità delle rocce metamorfiche è fortemente influenzata dalla composizione e la densità del protolite, dal grado di metamorfismo, dalle condizioni termodinamiche. Infine, nel caso delle rocce sedimentarie vanno identificati due gruppi sulla base dei fattori che controllano la densità: sedimenti privi di pori (sali, carbonati densi, anidriti) nei quali la densità dipende dalla composizione mineralogica; sedimenti porosi (maggioranza dei casi) dove la densità dipende dalla composizione mineralogica, dalla porosità e dalla composizione del contenuto dei pori.

Il terzo parametro fondamentale nella descrizione delle proprietà termo-fisiche di un materiale è la *capacità termica*, definita dal prodotto tra calore specifico e densità:

$$\text{capacità termica} = \text{calore specifico} \times \text{densità}$$

La capacità termica rappresenta la quantità di calore (J) che bisogna cedere o

togliere ad un volume unitario (m^3) di una sostanza per innalzarne o diminuirne la temperatura di 1 K. Essa viene misurata, secondo il SI, in J/m^3K ed il suo simbolo è C. Può essere espressa a volume costante (C_v) o a pressione costante (C_p). La capacità termica è isotropica al contrario della conducibilità termica. Questo parametro, essendo direttamente proporzionale al calore specifico, aumenta notevolmente con la temperatura; risulta quindi fondamentale stabilire una temperatura standard di riferimento per la comparazione di vari campioni. I valori più bassi di capacità termica si registrano per minerali poco densi, come sali evaporitici, generalmente dominanti in rocce sedimentarie, mentre i valori più alti sono rappresentati dai minerali non solforosi, inclusi olivine, pirosseni, anfiboli, ossidi di metalli pesanti (Waples D.W., 2004). In questi ultimi la capacità termica diminuisce all'aumento della densità. Per le rocce non porose la capacità termica dipende fortemente dal contenuto in carbonio e quindi dalle condizioni di formazione e successive variazioni chimiche. Per le rocce porose invece, hanno grande influenza i fluidi di poro.

In ultimo, la *diffusività termica* è la velocità con cui il calore si trasmette ed è definita come l'inerzia termica di un materiale, descritta come il rapporto fra conducibilità termica e il prodotto di densità e calore specifico del corpo oggetto di studio. La sua unità di misura secondo il SI è m^2/s e viene misurata indirettamente dalla strumentazione di laboratorio a partire dai valori di conducibilità termica k , calore specifico c_p e densità ρ secondo la seguente relazione:

$$\alpha = \frac{k}{\rho c_p}$$

La diffusività termica è una caratteristica intrinseca del corpo in quanto dipende esclusivamente da parametri relativi al materiale di cui è composto. Assume valori nel range 10^{-3} - 10^{-2} cm^2/s nel caso delle rocce e diminuisce all'aumentare della temperatura.

Nel caso oggetto di studio si andranno ad utilizzare i parametri sopra descritti per verificare l'idoneità del sottosuolo ai fini dello scambio termico per sistemi close loop (Gale I., 2005; Botteghi S. et al., 2013; Galgaro A. et al., 2015; Busby J. et

al., 2009; Ondreka J. et al., 2007; Gemelli A. et al., 2011; ; Garcia-Gal A. et al., 2015; Fujii H. et al., 2007). Per i valori di tali parametri si farà riferimento alle linee guida tedesche del lavoro “Thermal use of the underground” del 2010 e alle linee guida per gli impianti geotermici RSE del 2012; in questi lavori è riportata una tabella che illustra i valori di conducibilità termica, capacità termica e densità dei vari materiali. Nella sezione in esame si andrà a classificare ogni litologia le proprietà termo-fisiche ad essa associate. Nel prossimo capitolo invece si andrà a verificare l’idoneità o meno di questi parametri associata a sistemi close loop attraverso la costruzione della mappa d’idoneità. L’operazione di classificazione riguarda l’area di Johannesburg, Durban e Cape Town nella quale, alla tabella precedentemente redatta, riguardante le varie litologie, si assoceranno i relativi valori di conducibilità termica. Dunque, nella tabella seguente verrà riportato il valore di conducibilità termica della roccia (λ_r) e la conducibilità termica media (λ_m) delle rocce di ogni formazione.

JOHANNESBURG AREA

FORMAZIONE GEOLOGICA	LITOLOGIA	λ_r (W/mK)	λ_m (W/mK)
Vryhed Formation	Arnaria	2,8	2,45
	Argillite	2,1	
Dwyka Group	Tillite	2,4	2,4
Rustenburg Layered Suite	Gabbro	2	2
Magaliesberg Formation	Quarzite	5,5	5,5
Silverton Formation	Argillite	2,1	2,1
Daspoort Formation	Quarzite	5,5	3,8
	Arenatia a grana fine	2,2	
Hekpoort Formation	Andesite	1,7	1,7
Timeball Hill	Quarzite	5,5	3,8
	Argillite	2,1	
Chuniespoort Group	Dolomia	3,5	3,5
Black Reef Formation	Quarzite	5,5	3,3
	Conglomerato	2,3	
	Argillite	2,1	

Kameeldoorns Formation	Breccia	2,3	2,3
	Conglomerato	2,3	
Klipriviersberg Group	Andesite	1,7	1,4
	Tufo	1,1	
Central Rand Group	Arenite	2,8	2,8
West Rand Group	Quarzite	5,5	3,3
	Argillite	2,1	
	Conglomerato	2,3	
Basement Complex	Granito	3,2	3,2

Tabella 24. La tabella associa ad ogni litologia delle varie formazioni dell'area di Johannesburg i relativi valori di conducibilità termica (VDI 4640).

DURBAN

FORMAZIONE GEOLOGICA	LITOLOGIA	λ_r (W/mK)	λ_m (W/mK)
Maputaland Group	Sabbia satura	2,4	2
	Argilla satura	1,8	
	Sabbia fine satura	1,8	
Ecca Group	Argillite	2,2	2,5
	Arenaria	2,8	
Dwyka Group	Tillite	2,4	2,4
Misikaba Formation	Quarzite	5,5	3,8
	Argillite	2,1	
Natal Metamorphic Province	Granito	3,2	3
	Gneiss	2,9	

Tabella 25. La tabella associa ad ogni litologia delle varie formazioni dell'area di Durban i relativi valori di conducibilità termica (VDI 4640).

CAPE TOWN

FORMAZIONE GEOLOGICA	LITOLOGIA	λ_r (W/mK)	λ_m (W/mK)
Sanveld Group	Sabbia satura	2,4	2,4
Table Mountain	Arenaria	2,8	2,8
Klipuwel Group	Conglomerato	2,3	2,4
	Arenaria	2,8	
	Argillite	2,2	
Cape Granite Suite	Granite	3,2	3,2

Malmesbury Group	Siltstone	2,2	2,2
------------------	-----------	-----	-----

Tabella 26. La tabella associa ad ogni litologia delle varie formazioni dell'area di Cape Town i relativi valori di conducibilità termica (VDI 4640).

5.1.4-Temperature medie del sottosuolo

La media annua delle temperature dell'aria, salvo casi di anomalie termiche come zone termali, vulcaniche o di rift, corrisponde al valore termico del primo sottosuolo (fino a circa 100m) (Banks D., 2008). Come sopra scritto però, è necessario definire cosa s'intende per "primo sottosuolo"; nei paragrafi precedenti infatti è stata riportata una suddivisione del terreno dal punto di vista termico:

- *strato termicamente instabile;*
- *strato termicamente stabile.*

Lo strato termicamente instabile è la porzione di sottosuolo dove la temperatura non è costante, in quanto influenzata dalle fluttuazioni climatiche atmosferiche, ed è quello strato che interessa prevalentemente sistemi di geo scambio a sistema chiuso a sviluppo orizzontale. Questi sistemi hanno un funzionamento particolare, precedentemente trattato, che non si fonda sul fatto di avere una stabilità termica del sottosuolo. Ciò che ha notevole affinità con la temperatura media del terreno è lo strato termicamente stabile, rappresentato dalla porzione di sottosuolo la cui temperatura non risente dalle fluttuazioni climatiche, ma dipende principalmente dal flusso geotermico e dalla presenza di falde sotterranee.

In entrambi gli strati le condizioni termiche del terreno possono essere alterate dalla presenza dell'acqua di falda, la quale, in relazione della sua velocità di scorrimento, può influire sulla capacità di scambio termico e sulla capacità di accumulo energetico (energy storage).

La temperatura dello strato termicamente stabile, che generalmente corrisponde anche alla temperatura dell'acqua di falda, in quanto assume la stessa temperatura del sottosuolo e, come sopra accennato, la si può calcolare come il valore della

media annuale delle temperature dell'aria esterna. Chiaramente questa relazione è più o meno corretta per il sottosuolo fino a circa 100m di profondità e assumendo che ci sia un gradiente geotermico standard, ovvero di pari a 0,03 °C/m. Se non si presentano queste condizioni geotermiche, quindi se ci si trova in aree di anomalia geotermica, appare ovvio che la relazione non trova validità, in quanto la media annua delle temperature dell'aria differisce da quella del sottosuolo. Nelle aree oggetto di questo studio (Johannesburg, Durban, Cape Town) non sono presenti condizioni geotermiche molto anomale, ma in seguito si andrà a definire in dettaglio il flusso di calore geotermico per ogni area di studio, ma il linea di massima le temperature medie dell'aria corrispondono più o meno a quelle del sottosuolo. Per la determinazione della temperatura indisturbata del terreno quindi si farà riferimento alla temperatura media dell'aria validata, dove possibile da dati termici del sottosuolo.

Per il calcolo della temperatura media dell'aria si è fatto riferimento ai grafici delle temperature riportati nel capitolo due nella sezione clima. Per validare questi dati, le medie mensili e annue sono state confrontate con i valori di un TRY (Test Reference Year) di Johannesburg, ed il risultato è riportato in tabella 27.

JOHANNESBURG

MESE	TEMPERATURA MEDIA (°C)*	TEMPERATURA MEDIA DA TRY (°C)
Gennaio	20	18,6
Febbraio	20	16,2
Marzo	19	18,6
Aprile	16,5	15,7
Maggio	13	13,6
Giugno	10,5	10,1
Luglio	10,5	10
Agosto	13	12,7
Settembre	17	16
Ottobre	18,5	17,2
Novembre	19	17,8
Dicembre	20	19,3

MEDIA	16,4	15,5
--------------	-------------	-------------

Tabella 27. La tabella mette a confronto i valori di temperatura relativi alla figura 27(*) riportata nel capitolo 3 e i dati di un TRY. I valori sono relativi alla città di Johannesburg. La media dei TRY è stata eseguita utilizzando i dati riportati in tabella, ovvero dati mediati dal TRY completo. Se si facesse la media considerando tutti i valori, e quindi non tenendo conto degli errori sui decimali, causati dalla suddivisione in medie mensili, la media totale risulterebbe pari a 15,9°C.

Il TRY utilizzato è del 2007, mentre i dati dei grafici corrispondono alle medie dei valori raccolti tra il 2000 ed il 2012. Quindi, vista la compatibilità temporale e viste le medie annue molto simili, risultanti dalle due diverse fonti, si ritiene che i dati possano essere attendibili e comparabili. Considerando inoltre che non si hanno a disposizione i TRY per le città di Durban e Cape Town, si ritiene che i dati riportati nei grafici possano essere considerati attendibili al fine di calcolare le temperature medie annue. In seguito sono riportate le tabelle relative alle temperature medie per le aree di Durban e Cape Town facendo riferimento ai dati dei grafici riportati al capitolo 3 nella sezione clima.

DURBAN

MESE	TEMPERATURA MEDIA (°C)*
Gennaio	25
Febbraio	25
Marzo	24,5
Aprile	22,5
Maggio	20
Giugno	17,5
Luglio	17,5
Agosto	18,5
Settembre	20
Ottobre	21
Novembre	22,5
Dicembre	24

MEDIA	21,5
--------------	-------------

Tabella 28. Media delle temperature mensili e annue per l'area di Durban (* Worldweatheronline).

CAPE TOWN

MESE	TEMPERATURA MEDIA (°C)
Gennaio	22
Febbraio	22,5
Marzo	21
Aprile	18,5
Maggio	16
Giugno	13,5
Luglio	13
Agosto	13,5
Settembre	15
Ottobre	17
Novembre	19
Dicembre	21

MEDIA	17,7
--------------	-------------

Tabella 29. Media delle temperature mensili e annue per l'area di Cape Town (*Worldweatheronline).

Da uno studio sul flusso di calore in Sudafrica (Dhansay T. et al., 2013) emerge che varia dai 30 agli 80 mW/m². Considerando la legge di Fourier sulla conduzione di calore è possibile stimare il flusso di calore avendo a disposizione la conducibilità termica del sottosuolo e il gradiente geotermico:

$$Q = - \lambda A \frac{\partial \theta}{\partial z}$$

dove Q è il flusso geotermico (W/m², watt per metro quadro); λ è la conducibilità termica (W/m·K, watt per metro kelvin); A è l'unità di superficie attraversata dal flusso di calore (m², metro quadro) e $\frac{\partial \theta}{\partial z}$ è il gradiente geotermico (Banks, 2012). Nel caso in esame si ha a disposizione il flusso geotermico e la conducibilità

termica del sottosuolo, quindi dalla legge di Fourier si è in grado di ricavare il gradiente geotermico. Dai dati a disposizione i flussi di calore relativi alle aree di Johannesburg, Durban e Cape Town sono rispettivamente di 35, 60 e 60 mW/m² quindi facendo una media delle conducibilità termiche del sottosuolo risulta che i gradienti geotermici sono pari a 11°C/km per Johannesburg, 24°C/km per Durban e 26°/Km per Cape Town. Considerando la profondità di sottosuolo interessata da questo studio, massimo 100m, appare evidente che questi gradienti geotermici, decisamente bassi, possano influenzare in modo non rilevante la temperatura indisturbata del sottosuolo calcolata dalle temperature medie dell'aria; quindi si ritiene che il flusso di calore geotermico non possa influenzare le temperature calcolate nelle tabelle.

6. Le mappe di idoneità

Al fine di realizzare le mappe di idoneità allo scambio termico è stato fondamentale individuare, analizzare e descrivere alcuni parametri, affrontati nel capitolo precedente.

Ciò che verrà affrontato in questo capitolo è il passaggio da dato descrittivo a dato numerico dei parametri, al fine di avere una serie di valori numerici da poter applicare alle carte tematiche, ottenendo così delle classi di valori omogenei che esprimano il grado d'idoneità del sottosuolo ad ospitare sistemi open e close loop. Gli elaborati da realizzare sono due, uno sull'idoneità del sottosuolo all'utilizzo di sistemi geotermici open loop, basato sui parametri idrogeologici sopra descritti, e uno sull'idoneità del sottosuolo all'utilizzo di sistemi geotermici close loop, basato sulle proprietà termo-fisiche dei materiali del sottosuolo.

In funzione della mappa da realizzare, ai parametri considerati verrà attribuito un punteggio in termini numerici, e la combinazione di questi parametri darà una scala di valori che indicheranno il grado di idoneità del sottosuolo ad ospitare il sistema geotermico in esame, dove il valore più basso indicherà l'idoneità minima, mentre quello più alto l'idoneità massima.

6.1 Mappe di idoneità allo scambio termico per sistemi open loop

La mappa di idoneità allo scambio termico per sistemi open loop identifica quelle aree dove è possibile utilizzare sistemi geotermici a circuito aperto in funzione delle caratteristiche idrogeologiche del sottosuolo.

Le mappe realizzate sono tre, ovvero una per l'area di Johannesburg, per Durban e per Cape Town.

Come introdotto sopra, questi elaborati grafici derivano dall'attribuzione di un punteggio ad ogni parametro considerato, e che la somma di questi parametri adeguatamente pesati in funzione dell'importanza, possa indicare la

predisposizione o meno del sottosuolo all'utilizzo di sistemi a circuito aperto attraverso una scala numerica.

I parametri sopra esaminati sono i seguenti: tipologia di acquifero, rendimento dell'acquifero, profondità della prima falda, idoneità geochimica e flusso di calore geotermico.

Per quanto riguarda la tipologia di acquifero, sembra non avere alcuna implicazione sul grado di idoneità, in quanto descrive semplicemente come l'acqua è contenuta e come scorre nell'acquifero, ovvero in fratture, caverne, pori, ma non è in funzione della quantità d'acqua disponibile, quindi questo parametro è stato esonerato dalla classificazione e non ne viene attribuito alcun punteggio. Altro parametro da esonerare è la qualità geochimica delle acque, in quanto tutti gli acquiferi presentano l'idoneità per il parametro e quindi, attribuirne un punteggio non discriminerebbe un'area da un'altra, visto che tutte sono idonee e avrebbero lo stesso valore numerico.

Infine secondo quanto esaminato al capitolo precedente sul flusso di calore e sulle temperature del sottosuolo, si è visto che il gradiente geotermico per le tre aree oggetto di studio è molto basso e quindi non influenza l'efficienza di tali sistemi geotermici.

Quindi i parametri discriminanti per l'attribuzione del grado d'idoneità del sottosuolo all'utilizzo di sistemi geotermici open loop, sono il rendimento dei vari acquiferi e la profondità della tavola d'acqua.

A questi due parametri è stato dato un punteggio che ne indica la predisposizione o meno ai suddetti sistemi (tabella 30 e 31). I punteggi sono stati come di seguito attribuiti:

RENDIMENTO DELL'ACQUIFERO

CLASSI DI RENDIMENTO (l/s)	PUNTEGGIO	CONDIZIONE
<0,5	0	Non favorevole

>0,5<2	1	Mediamente favorevole
>2	2	Favorevole

Tabella 30. La tabella riporta la suddivisione in classi di rendimento dei vari acquiferi, associandone un punteggio in funzione dell'idoneità.

PROFONDITA' DELLA TAVOLA D'ACQUA

CLASSI DI PROFONDITA' DELLA TAVOLA D'ACQUA (m)	PUNTEGGIO	CONDIZIONE
<10	3	Favorevole
>10<35	2	Mediamente favorevole
>35	1	Poco Favorevole

Tabella 31. La tabella riporta la suddivisione in classi di rendimento dei vari acquiferi, associandone un punteggio in funzione dell'idoneità.

A questo punto si andrà a costruire una scala di valori numerici frutto della combinazione dei punteggi riportati nelle tabelle 30 e 31. Al parametro “rendimento dell’acquifero” è stato attribuito un peso tre volte superiore rispetto al parametro “profondità della falda” in quanto si ritiene che sia più rilevante nella determinazione dell’idoneità. In funzione della somma di questi, risulterà un numero che ricadrà in una scala di valori da 1 a 9. Al fine di semplificare quanto più possibile le carte tematiche e renderne chiara e intuitiva la comprensione ad un ampio pubblico, all’interno della scala di valori risultante dalla combinazione e somma dei parametri, si sono riconosciute tre principali classi che traducono il grado di idoneità. La suddivisione delle classi è avvenuta come nella tabella sotto riportata:

PUNTEGGI RISULTANTI	GRADO DI IDONEITA'
1	Non idoneo
2	
3	
4	Mediamente idoneo
5	
6	
7	Idoneo
8	
9	

Tabella 32. *Suddivisione in gradi di idoneità in funzione del punteggio dei parametri per i sistemi a circuito aperto.*

La combinazione dei parametri è stata eseguita attraverso la sovrapposizione delle carte idrogeologiche e le carte della profondità della tavola d'acqua, entrambe suddivise come riportato in tabella 30 e 31. In questo modo attraverso il sistema informatico GIS, si sono tracciati dei poligoni per ogni combinazione possibile attribuendo così ad ogni area risultante il grado d'idoneità secondo la scala numerica sopra riportata.

Di seguito sono riportate le mappe d'idoneità allo scambio termico per sistemi open loop delle tre aree oggetto di studio: Johannesburg, Durban e Cape Town.

MAPPA DI IDONEITA' ALL'UTILIZZO DI SISTEMI GEOTERMICI A CIRCUITO APERTO DELL'AREA DI JOHANNESBURG

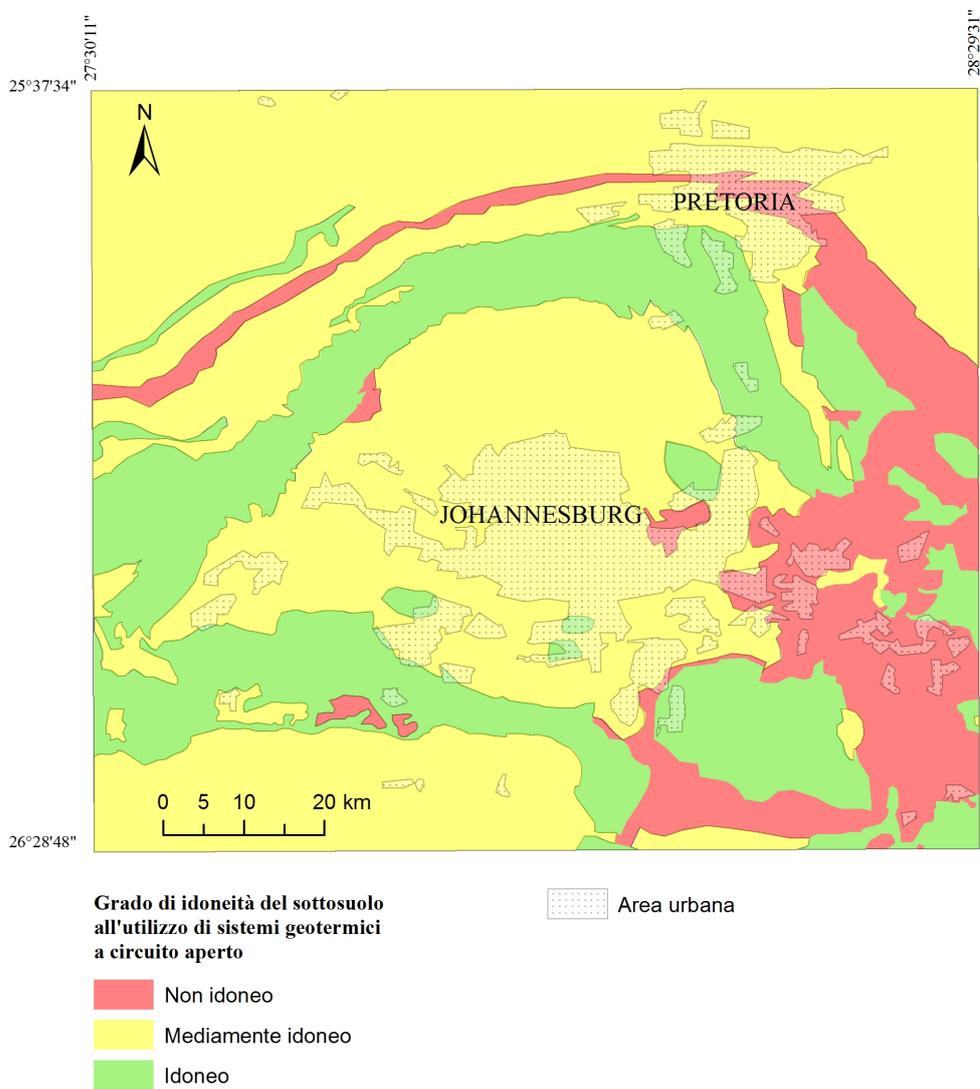


Figura 69. *Mappa di idoneità all'utilizzo di sistemi geotermici a circuito aperto dell'area di Johannesburg.*

MAPPA DI IDONEITA' ALL'UTILIZZO DI SISTEMI GEOTERMICI A CIRCUITO APERTO DELL'AREA DI DURBAN

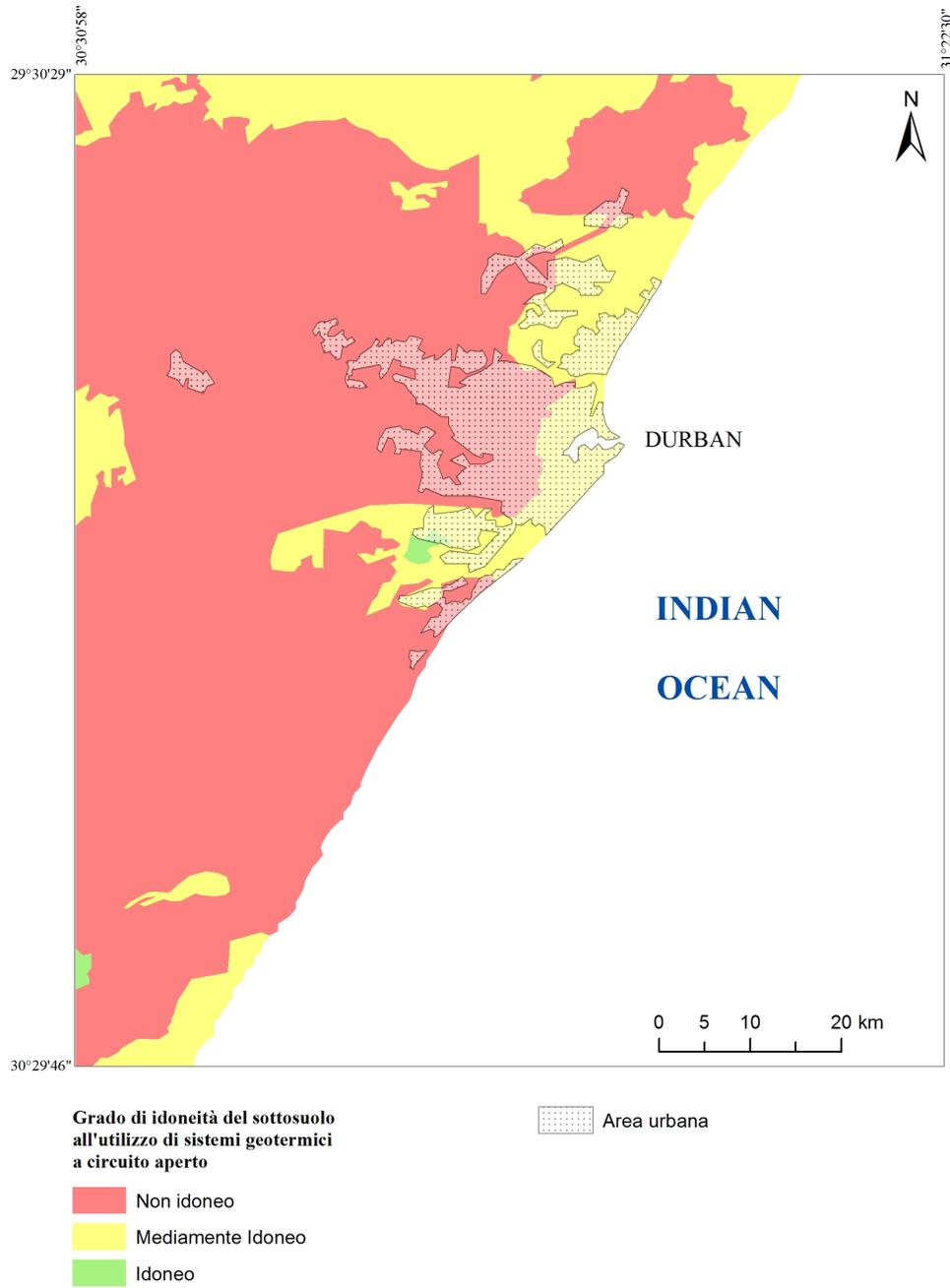


Figura 70. Mappa di idoneità all'utilizzo di sistemi geotermici a circuito aperto dell'area di Durban.

MAPPA DI IDONEITA' ALL'UTILIZZO DI SISTEMI GEOTERMICI A CIRCUITO APERTO DELL'AREA DI CAPE TOWN

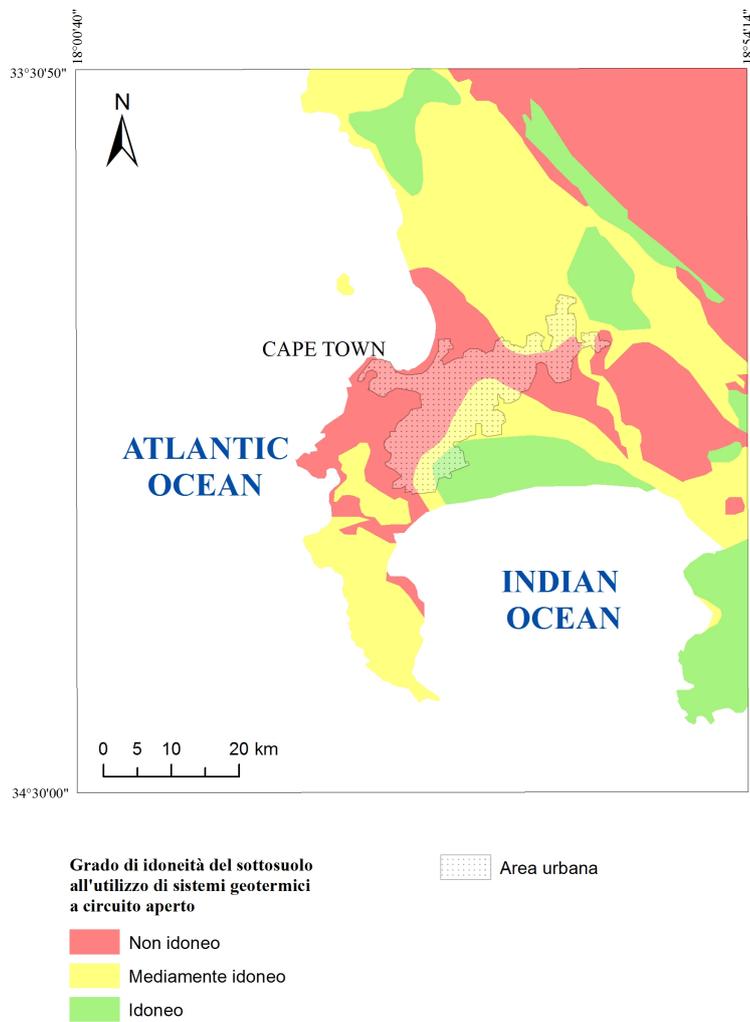


Figura 71. Mappa di idoneità all'utilizzo di sistemi geotermici a circuito aperto dell'area di Cape Town.

6.2 Mappe di idoneità allo scambio termico per sistemi close loop

La mappa di idoneità allo scambio termico per sistemi close loop vuole identificare e discriminare quelle aree dove è possibile utilizzare sistemi geotermici a circuito chiuso, in funzione delle proprietà termo-fisiche dei materiali del sottosuolo. Le mappe si sono realizzare per ogni sito di studio, ovvero per l'area di Johannesburg, Durban e Cape Town.

Come introdotto sopra, questi elaborati grafici derivano dall'attribuzione di un punteggio ad ogni parametro considerato, e che la somma di questi parametri, opportunamente pesati, possa indicare la predisposizione o meno del sottosuolo all'utilizzo di sistemi a circuito chiuso attraverso una scala numerica.

Dal punto di vista delle proprietà termiche del sottosuolo finalizzate a creare mappe di idoneità all'utilizzo di sistemi a circuito chiuso, le tre aree studiate risultano in generale tutte idonee; infatti negli elaborati grafici realizzati si vuole esprimere solamente il livello d'idoneità, visto che la condizione è quasi sempre favorevole.

In questa tesi per determinare il grado d'idoneità del sottosuolo all'utilizzo di sistemi geotermici close loop sono stati presi in considerazione i seguenti parametri: conducibilità termica del sottosuolo, durezza delle rocce e flusso di calore. Secondo quanto esaminato al capitolo precedente sul flusso di calore e sulle temperature del sottosuolo, si è visto che il gradiente geotermico per le tre aree oggetto di studio è molto basso e quindi non influenza l'efficienza di tali sistemi geotermici.

Quindi, i parametri discriminanti per l'attribuzione del grado d'idoneità del sottosuolo all'utilizzo di sistemi geotermici close loop, sono la conducibilità termica e la durezza delle rocce già illustrati nel capitolo 5.

A questi due parametri è stato dato un punteggio che ne indica la predisposizione o meno ai suddetti sistemi (tabella 33 e 34). I punteggi sono stati come di seguito attribuiti:

CONDUCIBILITA' TERMICA

CLASSI DI CONDUCIBILITA' TERMICA (W/mK)	PUNTEGGIO	CONDIZIONE
< 1	1	Poco favorevole
>1≤2	2	Mediamente favorevole
>2≤3	3	Favorevole
>3	4	Molto favorevole

Tabella 33. La tabella riporta la suddivisione in classi conducibilità termica delle varie litologie, associandone un punteggio in funzione dell'idoneità.

DUREZZA

DUREZZA (MOHS)	PUNTEGGIO	CONDIZIONE
0 (sedimenti sciolti)	4	Molto favorevole
>0≤3	3	Favorevole
>3≤5	2	Mediamente favorevole
>5	1	Poco favorevole

Tabella 34. La tabella riporta la suddivisione in classi di durezza delle rocce, associandone un punteggio in funzione dell'idoneità.

A questo punto si andrà a costruire una scala di valori numerici frutto della combinazione dei punteggi riportati nelle tabelle 33 e 34. Al parametro “conducibilità termica” è stato attribuito un peso due volte superiore rispetto al parametro “durezza” in quanto si ritiene che sia più rilevante ai fini della determinazione dell'idoneità. In funzione della somma di questi, risulterà un

numero che ricadrà in una scala di valori compresa fra 3 e 12. Al fine di semplificare quanto più possibile le carte tematiche e renderne chiara e intuitiva la comprensione ad un ampio pubblico, all'interno della scala di valori risultante dalla combinazione e somma dei parametri, si sono riconosciute tre principali classi che traducono il grado di idoneità. La suddivisione delle classi è avvenuta come nella tabella sotto riportata:

PUNTEGGI RISULTANTI	GRADO DI IDONEITA'
3	Basso
4	
5	
6	Medio
7	
8	
9	Elevato
10	
11	
12	

Tabella 35. *Suddivisione in gradi di idoneità in funzione del punteggio dei parametri per i sistemi a circuito chiuso.*

La combinazione dei parametri è stata eseguita attraverso la sovrapposizione delle carte della conducibilità termica e le carte della durezza delle rocce, entrambe suddivise come riportato nelle tabelle 32 e 33. In questo modo attraverso il sistema informatico GIS, si sono tracciati dei poligoni per ogni combinazione possibile attribuendo così ad ogni area risultante il grado di idoneità secondo la scala numerica sopra riportata.

Di seguito sono riportate le mappe di idoneità allo scambio termico per sistemi close loop delle tre aree oggetto di studio: Johannesburg, Durban e Cape Town.

MAPPA DI IDONEITA' ALL'UTILIZZO DI SISTEMI GEOTERMICI A CIRCUITO CHIUSO DELL'AREA DI JOHANNESBURG

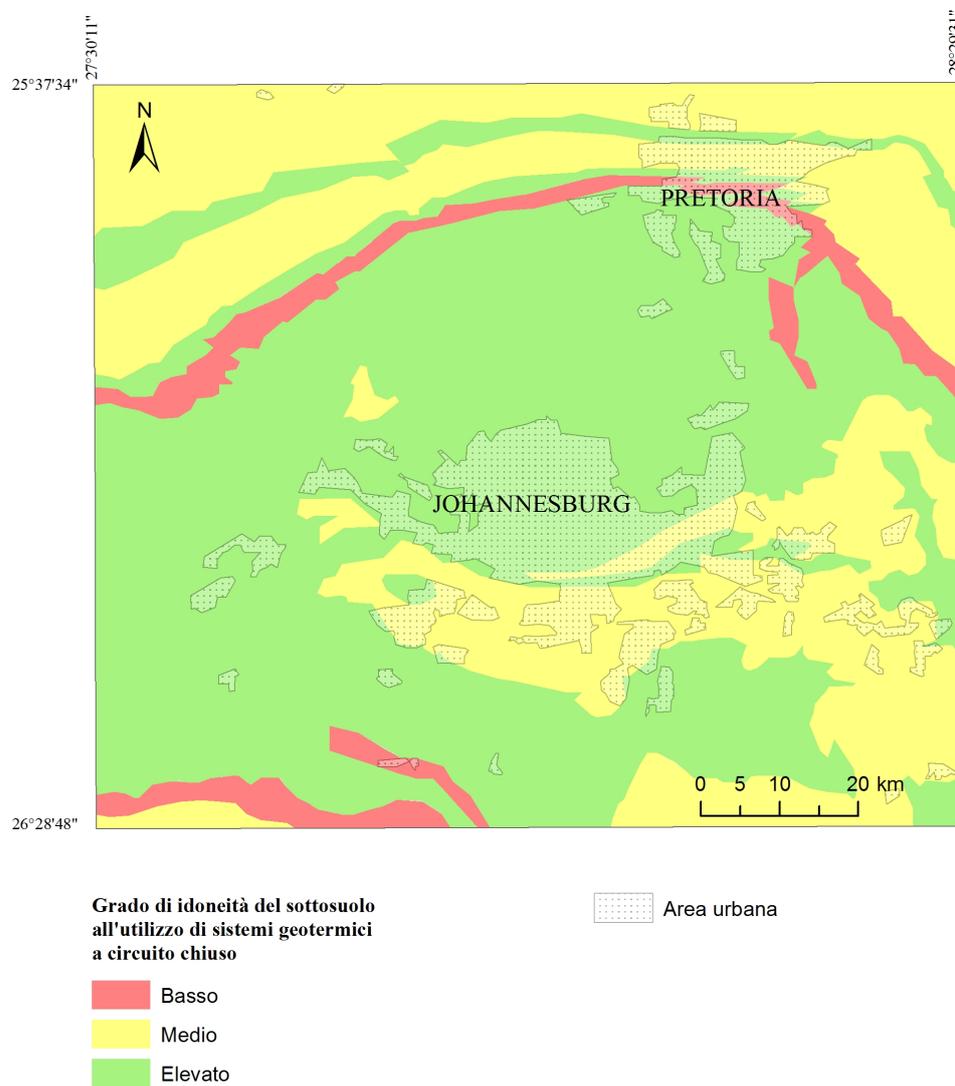


Figura 72. *Mappa di idoneità all'utilizzo di sistemi geotermici a circuito chiuso dell'area di Johannesburg.*

MAPPA DI IDONEITA' ALL'UTILIZZO DI SISTEMI GEOTERMICI A CIRCUITO CHIUSO DELL'AREA DI DURBAN

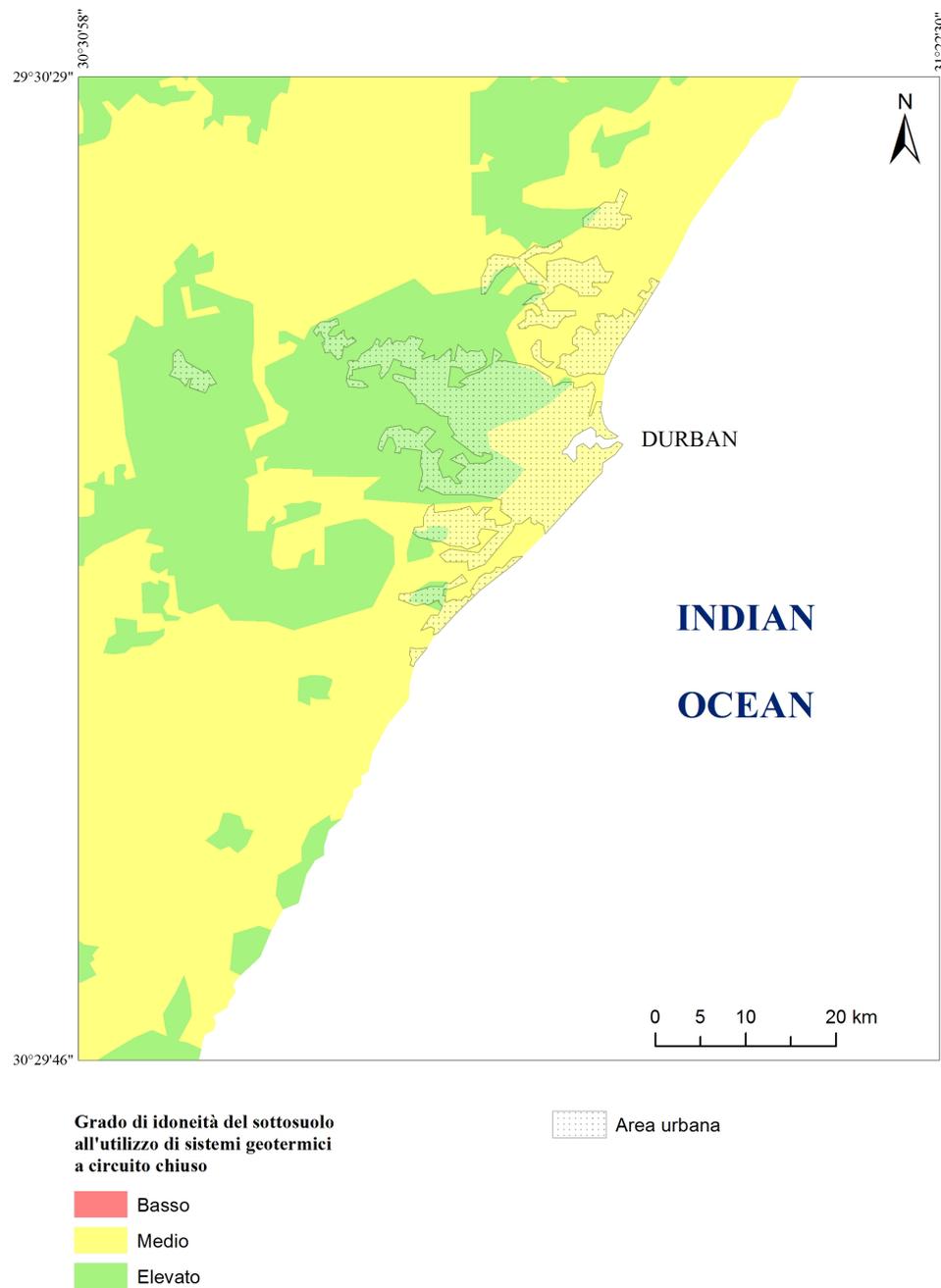


Figura 73. Mappa di idoneità all'utilizzo di sistemi geotermici a circuito chiuso dell'area di Durban.

MAPPA DI IDONEITA' ALL'UTILIZZO DI SISTEMI GEOTERMICI A CIRCUITO CHIUSO DELL'AREA DI CAPE TOWN

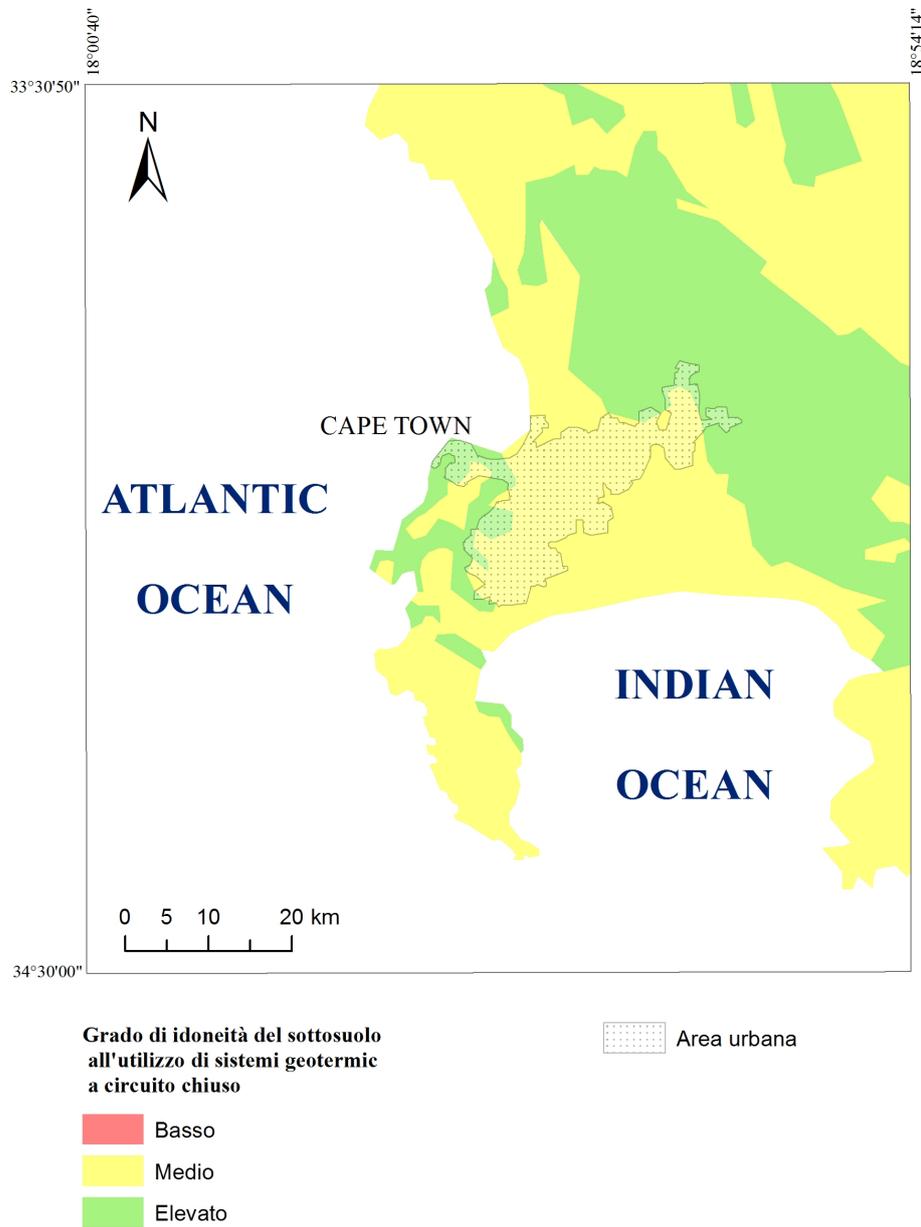


Figura 74. Mappa di idoneità all'utilizzo di sistemi geotermici a circuito chiuso dell'area di Durban.

7. Discussioni

Nel contesto attuale, dove il Pianeta si sta sovraccaricando di gas serra dovuti alla sempre più intensa industrializzazione, questa tesi può trovare maggior valenza, sostenibilità e condivisione da parte di molti Paesi, i quali aumentando la consapevolezza verso l'ambiente potrebbero avvicinarsi al settore geotermico e valutarlo come una possibile soluzione per il contenimento delle problematiche sopra elencate. La geotermia di bassa entalpia, come scritto anche nei capitoli precedenti, costituisce il più recente fronte d'interesse di studi e progresso tecnologico, considerato anche le normative sempre più rigide volte al risparmio energetico e alla sostenibilità ambientale come la riduzione dei gas serra.

In questa tesi si è svolto uno studio preliminare per determinare l'idoneità del sottosuolo all'utilizzo di sistemi geotermici di bassa entalpia in Sudafrica.

Il Sudafrica costituisce oggi un vasto paese emergente, con un grandissimo potenziale sull'industrializzazione, urbanizzazione e progresso tecnologico. In un Paese agli inizi di un sempre più imminente sviluppo generale, con questa tesi si vuole valorizzare la possibilità di una progressiva crescita del Paese basata sulla sostenibilità ambientale, valutando così la possibilità di sfruttare risorse naturali e rinnovabili del sottosuolo.

In questo lavoro vengono proposte delle carte tematiche che illustrano la possibilità di sfruttare il sottosuolo come mezzo di scambio termico per la climatizzazione di edifici potendo così affiancare, ridurre e/o sostituire l'uso dei combustibili fossili.

Un sistema geotermico di bassa entalpia si divide in due principali tipologie, a circuito aperto, dove il mezzo di scambio termico è l'acqua, e a circuito chiuso, dove il mezzo di scambio è il terreno o le rocce del sottosuolo. Sistemi geotermici di questo tipo in generale possono essere visti secondo due componenti: una componente invariante costituita dalle caratteristiche del sottosuolo, e una variabile costituita dall'impianto geotermico e dall'edificio.

In questa tesi si è cercato di esprimere, definendo al meglio la componente invariante "sottosuolo" attraverso l'individuazione di quei parametri che

influenzano l'efficienza e i costi di un impianto geotermico di bassa entalpia. In una seconda fase di lavoro questi parametri sono stati combinati nel modo più appropriato possibile e convertiti su carte tematiche che esprimono l'idoneità del sottosuolo all'utilizzo dei suddetti sistemi geotermici.

Questa tesi dunque possiamo riassumerla secondo le seguenti e principali fasi:

- raccolta dati di tipo geologico, idrogeologico, geotermico e climatico avvenuta in Sudafrica;
- analisi dei dati raccolti ed individuazione dei parametri necessari alla realizzazione delle carte d'idoneità;
- classificazione e descrizione dei parametri: *parametri geo-idrogeologici* espressi secondo litologia, durezza delle rocce, tipologia, rendimento e geochimica dei vari acquiferi; *parametri termo-fisici* che esprimono le caratteristiche di scambio termico delle rocce, e *parametri climatici* come le temperature delle varie aree e quelle del sottosuolo per valutare poi le esigenze di climatizzazione e l'efficienza dei sistemi proposti;
- conversione dei parametri da dato descrittivo a dato quantitativo numerico secondo una scala di valori in funzione dell'idoneità del parametro all'utilizzo di sistemi geotermici;
- realizzazione delle mappe d'idoneità, evidenziando e suddividendo così le aree in funzione dei parametri precedentemente convertiti.

Le mappe realizzate sono di due tipologie: una che valuta l'idoneità del sottosuolo all'utilizzo di sistemi geotermici a circuito aperto, considerando parametri idrogeologici come rendimenti degli acquiferi, geochimica delle acque e profondità della tavola d'acqua; e la seconda che riguarda l'idoneità del sottosuolo all'utilizzo di sistemi geotermici a circuito chiuso, considerando parametri geologici termo-fisici.

Queste due tipologie di carte sono state realizzate per tre aree che costituiscono i maggiori centri urbani del Sudafrica, ovvero Johannesburg, Durban e Cape Town. La scelta delle aree da esaminare è avvenuta in funzione dell'urbanizzazione di queste, in quanto i sistemi geotermici proposti vanno applicati alla

climatizzazione di edifici di tutte le tipologie, quindi si è deciso di porre l'attenzione alle aree maggiormente urbanizzate e abitate.

In questa tesi quindi si è voluto valorizzare ed esprimere il fattore invariante di un sistema geotermico ovvero le caratteristiche del sottosuolo. Sulla base di queste poi si possono applicare svariate tipologie impiantistiche come visto nel capitolo 4 o modificarne di già esistenti, ma ciò che non si può cambiare è appunto il sottosuolo.

Dalle carte realizzate è possibile fare delle considerazioni sull'applicabilità di tali sistemi geotermici valutando, nel caso che ci sia l'idoneità in entrambe le tipologie di sistemi, quale sia più opportuna da utilizzare. Iniziando dai sistemi a circuito aperto, a differenza di quelli a circuito chiuso, non sono sempre applicabili in quanto necessitano della presenza della risorsa idrica, meglio se di grande portata, inoltre è importante valutare la qualità delle acque perché come affrontato nel capitolo 4, possono contenere sostanze in grado di danneggiare pesantemente l'impianto. In aggiunta l'adozione di un sistema geotermico a circuito chiuso necessita di una fase progettuale molto delicata perché un errato dimensionamento dell'impianto può ripercuotersi su vaste aree attraverso fenomeni di subsidenza o inquinamento della falda acquifera; inoltre, per la salvaguardia della disponibilità nel tempo di questa, si consiglia di adottare un sistema per la reimmissione dell'acqua in falda.

In ultimo, per quanto riguarda i sistemi geotermici a circuito aperto, qualora ci siano le condizioni geo-idrogeologiche idonee sono preferibili rispetto ai sistemi a circuito chiuso, in quanto, per avere la stessa efficienza, il numero dei pozzi previsto è in ogni caso inferiore rispetto all'eventuale numero di sonde geotermiche del circuito chiuso, e questo si ripercuote in termini di costi e di tempistiche per la realizzazione dell'impianto.

Infine, in condizioni di idoneità del sottosuolo per entrambe le tipologie di sistemi geotermici, la scelta dell'una rispetto all'altra avviene anche in funzione della tipologia edilizia; considerando infatti una tipologia edilizia residenziale singola, in funzione dei carichi energetici annui di questa, solitamente è preferibile adottare una soluzione a circuito chiuso perché è soggetta a minor vincoli

normativi, per la praticità di realizzazione, e perchè non ha ripercussioni nell'alterare le condizioni del sottosuolo, se non nei dintorni della sonda. Considerando invece tipologie edilizie di maggiori dimensioni, come grandi complessi residenziali, data-center o attività industriali, i quali hanno richieste energetiche maggiori, qualora ci siano le condizioni idonee all'utilizzo di entrambi i sistemi geotermici studiati, si consiglia di adottare sistemi a circuito aperto, per i costi e tempi di realizzazione inferiori a quelli a circuito chiuso. Un'ultima riflessione interessante è valutare l'idoneità del sottosuolo all'utilizzo di sistemi geotermici di bassa entalpia in funzione del clima e, il possibile accoppiamento di tali sistemi con altri sistemi ad energia rinnovabile in modo da incrementarne l'efficienza o ampliarne lo spettro d'utilizzo.

Indipendentemente dalle differenti mappe d'idoneità per le tre aree di studio, queste presentano forti differenze di carattere climatico. In ottica geotermica l'area di Johannesburg, con il suo clima continentale dettato da calde estati con picchi superiori ai 30°C e da rigidi inverni, risulta avere tra le aree esaminate la condizione climatica più favorevole all'utilizzo dei sistemi geotermici proposti. Lo scambio termico con il sottosuolo, dalla temperatura intorno ai 15-16°C, costituisce il giusto compromesso tra l'esigenza di raffrescamento estivo e riscaldamento invernale. Con queste condizioni, gli impianti geotermici studiati risultano essere applicabili ad ogni tipologia di fabbricato.

Per quanto riguarda Durban invece, risulta avere la condizione climatica meno favorevole, considerato che sulla città persiste un clima sub-tropicale rappresentato da temperature elevate, che presentano una bassa escursione termica stagionale e quindi, in un'esigenza maggioritaria di raffrescamento, il sottosuolo non costituisce una fonte naturale "fredda", ma pari a circa la temperatura media annua, ovvero intorno ai 21-22°C.

Cape Town infine, presenta un clima mediterraneo dettato da calde estati ed inverni miti. L'escursione termica stagionale è piuttosto ampia, ciò determina che il sottosuolo, come per l'area di Johannesburg, costituisce un buon punto d'incontro tra l'esigenza di climatizzazione estiva ed invernale.

Tutte tre le aree presentano un forte irraggiamento annuo che potrebbe essere sfruttato attraverso collettori solari termici per realizzare sistemi stagionali di accumulo di calore, e pannelli fotovoltaici e pale eoliche, considerato il forte carattere ventoso dell'area di Cape Town, per la produzione di energia elettrica.

Conclusioni

In questo lavoro si sono evidenziate le potenzialità del sottosuolo ad essere utilizzato come mezzo di scambio termico da sistemi geotermici di bassa entalpia. Si è visto come il punto debole di questi sistemi sia dato dalla mancanza di conoscenza da parte di molti tecnici ed aziende, visto che rappresenta una tecnologia totalmente innovativa ma prossima ad un forte sviluppo ed incremento. Ciò che tali sistemi possono realizzare, se integrati a pompe di calore ed impianti idonei, è proprio la possibilità di renderli efficienti nel rispondere alle richieste di calore o freddo, senza bisogno dell'apporto energetico dato dalle tradizionali fonti fossili. Questo si traduce in una futura prospettiva di sostenibilità dei consumi energetici a partire dalle sole fonti rinnovabili, mantenendo i combustibili fossili come una semplice fonte ausiliaria relegata agli impieghi d'emergenza ed integrazione. Oltre al fatto di poter sostituire i tradizionali impianti di climatizzazione, i sistemi geotermici proposti, se progettati adeguatamente e accoppiati ad altri sistemi ad energia rinnovabile come i pannelli solari, hanno la possibilità di accumulare l'energia solare nel sottosuolo oppure offrono la possibilità di non disperdere più il calore scartato da processi industriali o di altro tipo, ma di stoccarlo per utilizzarlo laddove ce ne sia richiesta. Dietro a tutte queste caratteristiche, la parola d'ordine è risparmio energetico. Gli impianti geotermici di bassa entalpia sono decisamente l'anello di congiunzione tra la ricerca di indipendenza dai combustibili fossili e la sostenibilità di un fabbisogno energetico crescente, senza incidere negativamente sull'ambiente. Per la prima volta, attraverso questo lavoro, viene data la possibilità ad un Paese emergente come di Sudafrica di valutare per la sua crescita economica, industriale e tecnologica di intraprendere una strada volta al risparmio energetico e alla sostenibilità ambientale scegliendo di adottare sistemi geotermici di bassa entalpia per la climatizzazione di edifici. In questo modo, il Sudafrica, si farebbe portatore di un messaggio positivo nei confronti di tutti quei Paesi che rappresentano le maggiori potenze mondiali, e potendo essere preso da esempio da questi e dai Paesi emergenti, dimostrando di essere attento e sensibile al fatto

di dover ridurre l'uso di combustibili fossili, e le fonti d'inquinamento provocate da essi. Quindi considerato il Sudafrica in piena espansione, il fatto di poter adottare la soluzione geotermica di bassa entalpia nella climatizzazione di edifici potrebbe essere la chiave di volta per il successo ed il progresso del Paese.

Considerato ciò, si è scelto di svolgere questa tesi e di mettere a disposizione del Sudafrica delle informazioni su quelle che sono le sue potenzialità di espansione rendendosi autonomo ed indipendente da altri Paesi in termini energetici, sfruttando così le risorse del proprio sottosuolo.

Si tiene a precisare però, che quanto proposto in questa tesi, essendo il primo studio in ambito geotermico di bassa entalpia, è solamente un lavoro preliminare effettuato su macroaree e non considerando valori puntuali, ma dati relativi ad una media scala. Si spera che possa essere considerato e primo di numerosi lavori riguardanti la geotermica di bassa entalpia in Sudafrica.

Nel presente lavoro si è posta l'attenzione alla mappatura delle aree urbane dei tre maggiori centri del Paese, come Johannesburg, Durban e Cape Town, realizzando così delle mappe tematiche preliminari frutto della combinazione dei parametri esaminati che esprimano l'idoneità del sottosuolo sudafricano all'utilizzo di sistemi geotermici di bassa entalpia. E' chiaro quindi che in fase di progettazione di un sistema geotermico siano necessari degli studi più approfonditi e di dettaglio. Dunque, questa tesi, svolta per la prima fase di raccolta dati in Sudafrica, fino ad arrivare alla creazione di mappe di idoneità, ha voluto contribuire alla diffusione nel Mondo delle nuove tecnologie volte al risparmio energetico e alla riduzione delle fonti fossili, sperando di poter essere prima di altri e più specifici lavori riguardanti di queste tematiche in Sudafrica, proponendo al Paese di mettersi in gioco provando ad adottare tali tecnologie.

Bibliografia

Abdeen M. O., 2008, "Ground-source heat pumps systems and applications", *Renwable and Sustainable Energy reviews*, Volume 12, Issue 2, pp. 344-371.

Agangi, A., Hofmann, A., Rollion-Bard, C., Marin-Carbonne, J., Cavalazzi, B., Large, R. & Meffre, S. 2015, "Gold accumulation in the archaean witwatersrand basin, south africa-evidence from concentrically laminated pyrite", *Earth-Science Reviews*, vol. 140, pp. 27-53.

Akinbinu, V.A. 2015, "Increasing effect of metamorphism on rock properties", *International Journal of Mining Science and Technology*, vol. 25, no. 2, pp. 205-211.

Amaya V. Novo, Bayon J. R., Castro-Fresno D., Rodriguez-Hernandez J., 2010, "Review of seasonal heat storage in large basins: Water tanks and gravel-water pits", *Applied Energy* 87, pp. 390-397.

Anhaeusser, C.R. 2015, "Metasomatized and hybrid rocks associated with a Palaeoarchaean layered ultramafic intrusion on the Johannesburg Dome, South Africa", *Journal of African Earth Sciences*, vol. 102, pp. 203-217.

Anhaeusser, C.R. 2011, "Comments on the paper "petrology and geochemistry of the granitoid rocks of the Johannesburg Dome, Central Kaapvaal Craton, South Africa" by D.M. Van Tonder and H. Mouri (SAJG, 113, 257-286)", *South African Journal of Geology*, vol. 114, no. 1, pp. 211-216.

Banks, D. 2009, *An Introduction to Thermogeology: Ground Source Heating and Cooling*.

Barnard H. C., 2000, "An Explanation of the General Hydrogeological Map, Johannesburg 2526". Department of Water Affairs and Forestry, Pretoria, Johannesburg, RSA.

Barnard H. C., 1999, "Hydrogeological Map Johannesburg 2526", Department of Water Affairs and Forestry, Pretoria, Johannesburg, RSA.

Barnard H. C., 1997, "Geohydrogeological evaluation of the Maloney's Eye catchment area", Unpublished MSc Thesis, University of the Free State.

Basta S., Minchio F., 2008, "Geotermia e pompe di calore", Guida pratica agli impianti geotermici di climatizzazione, GEOTERMIA.ORG.

Bauer D., Marx R., Nußbicker-Lux J., Ochs F., Heidemann W., Müller-Steinhagen H., 2010, "German central solar heating plants with seasonal heat storage", *Solar Energy* n84, pp. 612-623.

Bayer P., Saner D., Bolay S., Rybach I., Blum P., 2012, "Greenhouse gas emission saving of ground source heat pump systems in Europe: a review. Renew", *Sustain. Energy Rev.* 16 (2), pp. 1256-1267

Bell, F.G. & Maud, R.R. 2000, "A groundwater survey of the greater Durban area and environs, Natal, South Africa", *Environmental Geology*, vol. 39, no. 8, pp. 925-936.

Botteghi S., Chiesa S., Destro E., Di Sipio E., Galgaro A., Manzella A., Montanari D., 2007-2013, "VIGOR: prime indicazioni tecnico prescrittive in materia di impianti di climatizzazione geotermica", pp. 29-39.

Bredenkamp D. B., Van Der Westhuizen, Weigmans C., F. E. and Khun C. M., 1986, "Groundwater supply potential of dolomite compartments west of Krugersdorp", Technical report Gh3440, Directorate Geohydrogeology, DWAF.

Bredenkamp D. B., Botah L. J., Van Rensburg H. J., and Van Tonder G. J., 1995, "Manual on quantitative estimation of groundwater recharge and aquifer storativity", WRC Contract TT 73/95. 363pp.

Bruno R., Tinti F., 2011, "Lo sfruttamento termico del sottosuolo", *Ecoscienza* n°2 pp. 28-29.

Bumby, A.J., Eriksson, P.G., Catuneanu, O., Nelson, D.R. & Rigby, M.J. 2012, "Meso-Archaeo and Palaeo-Proterozoic sedimentary sequence stratigraphy of the Kaapvaal Craton", *Marine and Petroleum Geology*, vol. 33, no. 1, pp. 92-116.

Burger A. J. and Coertze F. J., 1973, "Radiometric age measurements on rocks from southern Africa to the end of 1971". *Geol. Surv. S. Afr., Bull.* 58.

Busby J., Lewis M., Reeves H., Laweley R., 2009, "Initial geological considerations before installing ground source heat pump systems", *Q. J. Eng. Geol. Hydrogeol.* 42 (3), pp. 295-306.

Casasso, A. & Sethi, R. 2015, "Modelling thermal recycling occurring in groundwater heat pumps (GWHPs)", *Renewable Energy*, vol. 77, pp. 86-93.

Clarke, B.M. 2008, "The geology of the Natal Metamorphic Province in the Durban area", *South African Journal of Geology*, vol. 111, no. 1, pp. 1-20.

Clauser, C., 2011, "Thermal Storage and Transport Properties of Rocks, II: Thermal Conductivity and Diffusivity", Harsh Gupta (Ed.), *Encyclopedia of Solid Earth Geophysics*, 2nd ed., Springer, Dordrecht.

Cowling, R.M., Potts, A.J., Bradshaw, P.L., Colville, J., Arianoutsou, M., Ferrier, S., Forest, F., Fyllas, N.M., Hopper, S.D., Ojeda, F., Proches, S., Smith, R.J., Rundel, P.W., Vassilakis, E. & Zutta, B.R. 2015, "Variation in plant diversity in

mediterranean-climate ecosystems: The role of climatic and topographical stability", *Journal of Biogeography*, vol. 42, no. 3, pp. 552-564.

Danielewicz, J., Fidorow, N. & Szulgowska-Zgrzywa, M. 2013, "A ground source heat pump with the heat exchanger regeneration- Simulation of the system performance in a single family house", *Environmental Engineering IV - Proceedings of the Conference on Environmental Engineering IV*, pp. 357.

Dassargues A., Charlier R., Francois B., 2010, "Geothermal Properties of soil and rocks", *Shallow geothermy*.

Dehkordi, S.E., Olofsson, B. & Schincariol, R.A. 2014, "Effect of groundwater flow in vertical and horizontal fractures on borehole heat exchanger temperatures", *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*.

De Villers S. B., 1961, "Boorplekaanwysings vir water in Suidwes-Transvaal", *Bulletin 34, Geologiese Opname*.

Dhansay, T., De Wit, M. & Patt., A. 2014, "An evaluation for harnessing low-enthalpy geothermal energy in the limpopo province,south africa", *South African Journal of Science*, vol. 110, no. 3-4.

Dincer I., Rosen M. A., 2002, "Thermal Energy Storage – Systems and Applications".

Dingle, R.V. & Scrutton, R.A. 1974, "Continental breakup and the development of post-paleozoic sedimentary basins around southern Africa", *Bulletin of the Geological Society of America*, vol. 85, no. 9, pp. 1467-1474.

Dunlevey, J.N. & Smith, A.M. 2011, "Sedimentological evidence for an interglacial in the Permo-Carboniferous Dwyka Group, Coedmore Quarry, Durban, South Africa", *South African Journal of Geology*, vol. 114, no. 1, pp. 159-166.

Enslin J. F. and Kriel J. P., 1967, "The assesment and possible use of the dolomitic groundwater resources of the far West Rand", Transvaal. Int. Conf. Water for Peace, Washington.

Eriksson P. G., Clendenin C. W., 1990, "A review of the Transvaal Sequence, South Africa", *J. Afr. Earth Sci*, pp. 101-116.

Eriksson P. G., Altermann W., Hartzler F. J., 2006, "The Transvaal Supergroup and its precursors" *The Geology of South Africa*, Johnson M. R., Anhaeusser C. R., and Thoms R. J. eds., pp. 237-260.

Evans D.J., Reay D.M., Mitchell W.I., Busby J., 2006, "Appraisal of underground energy storage potential in Northern Ireland", *Nottingham British Geological*

Survey.

Florides G., Soteris K., 2007, "Ground heat exchanger – A review of systems, model and applications", *Renewable Energy*, 32 pp. 2461–2478.

Fujii H., Inatomi T., Itoi R., Uchida Y., 2007, "Development of suitability maps for the ground-coupled heat pump systems using groundwater and heat transport models", *Geothermics*, 36, pp. 459-472.

Gale I., 2005, "Ground source heat pumps: development of GeoReports for potential site characterisation", *British Geological Survey*.

Galgaro A., Di Sipio E., Teza G., Destro E., De Carli M., Chiesa S., Zarrella A., Emmi G., Manzella A., 2015, "Empirical modeling of maps of geo-exchange for shallow geothermal energy at regional scale", *Geothermics*.

García-Gil A., Va_zquez-Sun~e E., M. Alcaraz M., Serrano Juan A., Sa_nchez-Navarro J. A., Montlleo M., Rodríguez G., Lao J., 2015, "GIS-supported mapping of low-temperature geothermal potential taking groundwater flow into account", *Renew. Energy*. 77, pp. 268-278.

Gemelli A., Mancini A., Lomghi S., 2011, "GIS-based energy-economic model of low temperature geothermal resource: A case study in the Italian Marche region", *Renewable Energy*, 36, pp. 2474-2483.

Gil A., Medrano M., Martorell I., Lázaro A., Dolado P., Zalba B., Cabeza L. F., 2010, "State of the art on high temperature thermal energy storage for power generation". *Part 1 – Concepts, materials and modellization*, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14, pp. 31-35.

Goldreich, Y. 1992, "Urban climate studies in Johannesburg, A sub-tropical city located on a ridge-A review", *Atmospheric Environment. Part B, Urban Atmosphere*, vol. 26, no. 3, pp. 407-420.

Gresse P. G., Theron J. M., 1992, "Geology of the Worcester Area", Exlanation Sheet 3318, *Geological Survey of South Africa*.

Hamada Y., Marutani K., Nakamura M., Nagasaka S., Ochifuji K., Fuchigami S., Yokoyama S., 2002, "Study on underground thermal characteristics by using digital national land information, and its application for energy utilization", *Applied Energy*, 72, pp. 659-675.

Hartnady C. J. H. and Rogers J., 1990, "The scenery and geology of the Cape Peninsula", *Guidebook Geocongress '90 Geological Society of South Africa*, M1.

Heydorn A. E. F. and Tinley K. L., 1980, "Estuaries of the Cape. Part I, Synopsis of the Cape Coast", *Natural Features, Dynamic and Utilization*.

- Heinrich, C.A. 2015, "Witwatersrand gold deposits formed by volcanic rain, anoxic rivers and Archaean life", *Nature Geoscience*, vol. 8, no. 3, pp. 206-209.
- Hasnsin S. M., 1998, "Review on sustainable thermal energy storage technologies", *part I: heat storage materials and techniques*, *Energy Convers. Mgmt*, vol. 39 n.11 pp. 1127- 1138.
- Hobbs P. J., 1988, "Hydrogeology of the Verwoerdburg dolomite aquifer", Technical report Gh3502, Directorate Geohydrogeology, DWAF, 95pp.
- Kafri U., Foster M., Detremmerie F. and Simonis J., 1985, "The hydrogeology of the dolomite aquifer in the Kliprivernatalspruit Basin", Technical report Gh3408, Directorate Geohydrogeology, DWAF.
- King G. M., 2002, "An Explanation of the 1:500000 General Hydrogeological Map, Durban 2928", Department of Water Affairs and Forestry, Pretoria, Johannesburg, RSA.
- King G. M., 1998, "Hydrogeological Map Durban 2928", Department of Water Affairs and Forestry, Pretoria, Johannesburg, RSA.
- Kok T. S., 1993a, "Groundwater in rock of the Pretoria area", Technical report Gh 3749, Directorate Geohydrology, DWAF.
- Kok T. S., 1993b, "Waste disposal sites in the Transvaal and Highveld Regions", Technical report Gh3732, Directorate Geohydrogeology, Pretoria.
- Kok T. S., 1985, "Beraming van die grondwaterpotensiaal van die dolomite te Rietvallei 377 JR", distrik Pretoria, Technical report Gh3383, Directorate Geohydrogeology, DWAF.
- Kübler R., Fisch N., Hahne E., 1997, "High temperature water pit storage projects for the seasonal storage of solar energy", *Solar Energy* vol. 61 n.2 pp. 97-105.
- Kuhn C. M., 1986, "Geohydrogeological investigation of the Westen and Cental Steenkoppies compartment", Technical report Gh3446, Directorate Geohydrogeology, DWAF.
- Kuhn C. M., 1989, "Hydrogeology of the Midrand-Kempton Park dolomite" Technical report Gh33501, Directorate Geohydrogeology, DWAF.
- Lee, C., Park, S., Lee, D., Lee, I.-. & Choi, H. 2014, "Viscosity and salinity effect on thermal performance of bentonite-based grouts for ground heat exchanger", *Applied Clay Science*, vol. 101, pp. 455-460.
- Lenhardt, N. & Eriksson, P.G. 2012, "Volcanism of the Palaeoproterozoic Bushveld Large Igneous Province: The Rooiberg Group, Kaapvaal Craton, South Africa", *Precambrian Research*, vol. 214-215, pp. 82-94.

Lin, L., Lin, H. & Xu, Y. 2014, "Characterisation of fracture network and groundwater preferential flow path in the Table Mountain Group (TMG) sandstones, South Africa", *Water SA*, vol. 40, no. 2, pp. 263-272.

Lindeque, A., De Wit, M.J., Ryberg, T., Weber, M. & Chevallier, L. 2011, "Deep crustal profile across the Southern Karoo basin and beattie magnetic anomaly, South Africa: An integrated interpretation with tectonic implications", *South African Journal of Geology*, vol. 114, no. 3-4, pp. 265-292.

Marshall, C.G.A. & Von Brunn, V. 1999, "The stratigraphy and origin of the Natal Group", *South African Journal of Geology*, vol. 102, no. 1, pp. 15-25.

Masciale, R., de Carlo, L. & Caputo, M.C. 2015, "Impact of a very low enthalpy plant on a costal aquifer: a case study in Southern Italy", *Environmental Earth Sciences*.

McCarthy T.S., 2006, "The Witwatersrand Supergroup", *The Geology of South Africa*". Johnson M. R., Anhaeusser C. R, and Thoms, R.J eds., pp. 155-186.

Meyer P. S., 2001, "An Explanation of the 1:500000 General Hydrogeological Map, Cape Town 3317", Department of Water Affairs and Forestry, Pretoria, Johannesburg, RSA.

Meyer P. S., 2000, "Hydrogeological Map Cape Town 3317". Department of Water Affairs and Forestry, Pretoria, Johannesburg, RSA.

Mendonidis, P., Thomas, R.J., Grantham, G.H. & Armstrong, R.A. 2015, "Geochronology of emplacement and charnockite formation of the Margate Granite Suite, Natal Metamorphic Province, South Africa: Implications for Natal-Maud belt correlations", *Precambrian Research*.

Musa M. L., 2010, "Modellazione dei sistemi di accumulo termico per impianti solari".

Nam Y., Ooka R., 2011, "Development of potential map for the ground and groundwater heat pump systems and application to Tokyo", *Energy build.* 43(2), pp. 677-685.

Nguuri T., Gore J., JamesD. E., Webb S. J., Wright C., Zengeni T. G., Gwavava O., Snoke J. A., and Kaapvaal Seismic Group, 2001, "Crustal structure beneath southern Africa and its implications for the formation and evolution of the Kaapvaal and Zimbabwe cratons", *Geophysical Research Letters* 28 (13), pp. 501-504.

Noorollahi Y., Itoi R., Fujii H, Tanaka T., 2007, "GIS model for geothermal resource exploration in Akita and Iwate prefectures, northern Japan", *Computers & Geosciences*. 33, pp. 1008-1021.

- Noorollahi Y., Itoi R., Fujii H, Tanaka T., 2008, “GIS integration for geothermal exploration and well siting”, *Geothermics* 37, pp. 107-131.
- Nyblade A. A., and Robinson S. W., 1994, “ The African Superswell”, *Geophysical Research Letters* 21, pp. 765–768.
- Okazaki, T., Shirai, Y. & Nakamura, T. 2015, "Concept study of wind power utilizing direct thermal energy conversion and thermal energy storage", *Renewable Energy*, vol. 83, pp. 332-338.
- Ondreka Y., Rusgen M. I., Stober I., Czurda K., 2007, “GIS-supported mapping of shallow geothermal potential of representative areas in south-western Germany – possibilities and limitation”, *Renew. Energy* 32 (13), pp. 2186-2200.
- Phillips, G.N. & Powell, R. 2015, "Hydrothermal alteration in the Witwatersrand goldfields", *Ore Geology Reviews*, vol. 65, no. P1, pp. 245-273.
- Polivka J., 1987, “Geohydrogeological investigation of the Schoonspruit compartment in the dolomite area of Ventersdorp”, Technical report Gh3524, Directorate Geohydrogeology, DWAf.
- Qualls, C. 2012, "Geothermal heating and cooling options", *Engineered Systems*, vol. 29, no. 9, pp. 32-36.
- Qualls C., 2013, “Geothermal Systems for Commercial Facilities”, *Heating/Piping/Air Conditioning Engineering*, 85, 2, pp. 24-29.
- Robb L.J., Meyer F.M., 1995, “The Witwatersrand Basin, south Africa: Geological framework and mineralization processes”, *Ore Geol. Rev.*, pp. 67-94.
- Rode, A., Liesch, T. & Goldscheider, N. 2015, "Open-loop geothermal heating by combined extraction-injection one-well systems: A feasibility study", *Geothermics*, vol. 56, pp. 110-118.
- Safa, A.A., Fung, A.S. & Kumar, R. 2015, "Heating and cooling performance characterisation of ground source heat pump system by testing and TRNSYS simulation", *Renewable Energy*, vol. 83, pp. 565-575.
- Schilliereff H. S., 2008, “Using Hydrogeological data for geoexchange potential mapping, City of Whitehorse, Yukon”, *GeoEdmonton’08*, pp. 1445-1448.
- Schlüter T., 2006, *Geological Atlas of Africa, with Notes on Stratigraphy, Tectonics, Economic Geology, Geohazards and Geosites of Each Country*.
- Sharma A., Tyagi V. V., Chen C. R., Buddhi D., 2009, “Review on thermal energy storage with phase change materials and applications”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13, pp. 318-345.
- Singh M., Kijko A., Durrheim R., 2009, “*Seismotectonic models for south africa*:

synthesis of geoscientific information, problems, and the way forward", *Seismological research letters*.V. 80, N1, pp 71-80.

Song, W., Ni, L. & Yao, Y. 2014, "Experiment on single well groundwater heat pump systems in different distances between pumping and injection screens", *Nongye Gongcheng Xuebao/Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, vol. 30, no. 2, pp. 205-211.

Spencer, C.J., Thomas, R.J., Roberts, N.M.W., Cawood, P.A., Millar, I. & Tapster, S. 2015, "Crustal growth during island arc accretion and transcurrent deformation, Natal Metamorphic Province, South Africa: New isotopic constraints", *Precambrian Research*, .

Tamiru A. A., 2011, "Provenance of groundwater in the crystalline aquifer of Johannesburg area, South Africa", *International Journal of the Physical Sciences*, Vol. 6 (1), pp. 98-111.

Tankard A. J., Jackson M. B. A., Eriksson K. A., Hobday D. K., Hunter D. R. and Minter W. E. L., 1992, "Crustal evolution of Southern Africa", *SpringerVerlag, New York* 523pp.

Tavener-Smith, R. 1980, "The Skolithos-bearing sandstone at Newlands Estate, Durban (South Africa): a suspected shallow water, off-shore sand tongue in the lower Ecca Group (Pietermaritzburg Formation).", *Transactions, Geological Society of South Africa*, vol. 83, no. 1, pp. 87-91.

Theron J. M., Gresse P. G., Siegfried H. P. and Rogers J., 1992, "Geology of the Cape Town Area" Exlanation Sheet 3318, *Geological Survey of South Africa*.

Tshibanda, M. & Pretorius, J.-C. 2013, "A statistical analysis of Cape Town wind profile", *IEEE AFRICON Conference*.

Tufekçi N., Suzen L. M., Guleç N., 2010, "GIS based geothermal potential assessment: A case study of Western Anatolia, Turkey", *Energy* 35, pp. 246-261.

Van Tonder, D.M. & Mouri, H. 2010, "Petrology and geochemistry of the granitoid rocks of the johannesburg dome, central kaapvaal craton, South Africa", *South African Journal of Geology*, vol. 113, no. 3, pp. 257-286.

Waples W., Waples J., 2004, "A Review and Evaluation of Specific Heat Capacities of Rocks, Minerals, and Subsurface Fluids", *Part I: Minerals and Nonporous Rocks, Natural Resources* Vol 13, No.2.

Waples W., Waples J., 2004, "A Review and Evaluation of Specific Heat Capacities of Rocks, Minerals, and Subsurface Fluids", *Part II: Fluids and Porous Rocks, Natural Resources* Vol 13, No.2.

Wilson M. G. C., 2005, "Simplified Geology, Selected Mines and Mineral Deposits-South Africa, Lesotho and Swaziland", Council for Geoscience, Pretoria.

Wong B., Snijders A., McClung L., 2006, "Recent Inter-Seasonal Underground Thermal Energy Storage Applications in Canada".

Wu, R., Tinjum, J.M. & Likos, W.J. 2015, "Coupled Thermal Conductivity Dryout Curve and Soil–Water Characteristic Curve in Modeling of Shallow Horizontal Geothermal Ground Loops", *Geotechnical and Geological Engineering*, vol. 33, no. 2, pp. 193-205.

Zarella A., Capozza A., De Carli M., 2013, "Analysis of short helical and double U-tube Borehole heat exchangers: a simulation-based comparison", *Appl. Energy* 112, pp. 358-370.

Zoback M. L., 1992, "First hand second-order patterns of stress in the lithosphere: The World Stress Map Project", *Journal of Geophysical Research* 97, 11, pp.703–728.

WEBGRAFIA

geothermalinstallation.wordpress.com

geothermalgenius.org

OpenStax CNX

underground-energy.com/ATES

worldweatheronline.com

SI RINGRAZIA:

HiRef S.p.a, in particolare Ing. Mauro Mantovan, Ing. Wolfgang Fels e tutto lo staff

Hiref South Africa e tutto lo staff

Prof. Antonio Galgaro

Dott. Andrea Ninfo

Dott.ssa Eloisa Di Sipio

