

HOT, DRY AND ANCIENT: BANDED IRON FORMATIONS OF WESTERN AUSTRALIA

Neil Gibson, David Coates, Stephen van Leeuwen & Colin Yates

Introduction

Banded Iron Formations (BIF) in Western Australia are confined to the two oldest cratons in the region, and these cratons, the Yilgarn in the south and the Pilbara in the north-west, formed the core of the developing continent of Australia (Figure 1; Huston *et al.* 2012). A consensus on the origins of BIF is yet to be reached (Posth *et al.* 2011, Lewy 2012), but two broad groups have been recognised: Algoma BIFs which are generally small in lateral extent and most often associated with volcanics; and Superior BIFs that are, in contrast, vast in extent with little volcanic influence (Gross 1980; Posth *et al.* 2011). The Algoma type best describes the Yilgarn BIFs, which are relatively small and are embedded in Archean greenstone (volcanic) belts that have undergone significant deformation (Figure 2a&b). In contrast, the Superior type best describes the majority of the BIFs in the Pilbara, which occur in the Hamersley Range. These deposits are immense, covering an area of > 60,000 km², with thicknesses of > 100 m, and have macro and micro scale banding patterns which can be traced for 80 – 300 km (Figure 3). They are believed to have formed in large sedimentary basins (Trendall 2002). Smaller occurrences of Algoma type BIFs occur elsewhere in the Pilbara (Figure 3).

While the Hamersley Range BIFs formed somewhat later (2590 – 2450 Ma) than the Yilgarn BIFs (3000 – 2800 Ma) (Trendall 2002; Mole *et al.* 2013), the geochemistry of both are very similar as are patterns of meso- and micro-banding implying a similar geochemical origin. While some authors reject the classification of Western Australian BIFs into Algoma vs Superior types and suggest the differences in thickness and extent have arisen primarily due to the extensive metamorphic reworking that occurred during the genesis of the Yilgarn craton (Gole 1981; Trendall 2002); the classification forms a useful subdivision of BIF types in Western Australia. In the Pilbara we include the Tertiary Channel Iron Deposits that formed in meandering paleodrainage channels and the Detrital Iron Deposits that formed on bajadas as a result of Pliocene deposition from the erosion of nearby Archean / Proterozoic Banded Iron Formations. These occur across the Hamersley Basin and formed ca. 28 – 5 Ma (Huston *et al.* 2012).

Recent work in both Brazil and Australia has shown that some areas of BIFs are major centres of biotic diversity (Jacobi *et al.* 2007; Gibson *et al.* 2010; Gibson *et al.* 2012; Pepper *et al.*

2013) and this can lead to difficult land use decisions as the BIFs are also a major source of iron ore. In this chapter we will review what is known of the biota of these ancient range systems then provide some current statistics on iron ore mining in Western Australia, briefly outline the government processes followed in the development of a mining proposal, and discuss strategies being developed to minimize impacts of mining on conservation values.

Flora

The flora of the Yilgarn and Pilbara BIFs has, until recently, been poorly documented and the conservation status of many taxa remains unknown. However, increased exploration and mining of iron ore in Western Australia has resulted in a dramatic increase in botanical survey on and around the BIF ranges in both regions. Concomitant with this has been an increase in taxonomic effort to delimit and describe new species, and assess conservation status (Gibson *et al.* 2007; Wege *et al.* 2014). For example, a targeted taxonomic study over 2006 and 2007 on BIF ranges of the Yilgarn and other areas of high potential for mining resulted in 95 newly described taxa from 21 families and 33 genera with 78 taxa considered to be of conservation concern (Wege *et al.* 2007). Despite this effort many other taxa in both the Yilgarn and Pilbara BIFs are recognised as distinct and are probably of conservation significance but remain undescribed.

Comparison of Yilgarn and Pilbara patterns

Composition and life forms

The vegetation and flora have been studied in some detail for 24 ranges in the Yilgarn and a recent overview of the patterns found on these ranges has been published (Gibson *et al.* 2012) (Figure 1). The BIF in these ranges tends to occur as highly metamorphosed linear outcrops within wider greenstone belts. The BIF outcrop generally extends for 30 – 50 km in length and up to 5 km wide and rarely rise more than 200 m from the surrounding plain. A flora of some 906 taxa has been recorded from these ranges and they are characterized by high beta diversity and concentrations of BIF endemics on particular ranges. The area between greenstone belts is dominated by woodland or shrublands developed on colluvial and alluvial deposits or on oligotrophic sandplains that have developed *in situ* from Tertiary laterization. Occasionally the granitic basement rock outcrops as domed shaped inselbergs. The climate is best characterised as Mediterranean semi-arid in the southwest grading to sub-tropical semi-arid in the northeast. Rainfall is generally associated with fronts embedded in the westerly airstream during winter. The influence of these westerlies decreases in the north where rainfall from decaying tropical depressions becomes more important.

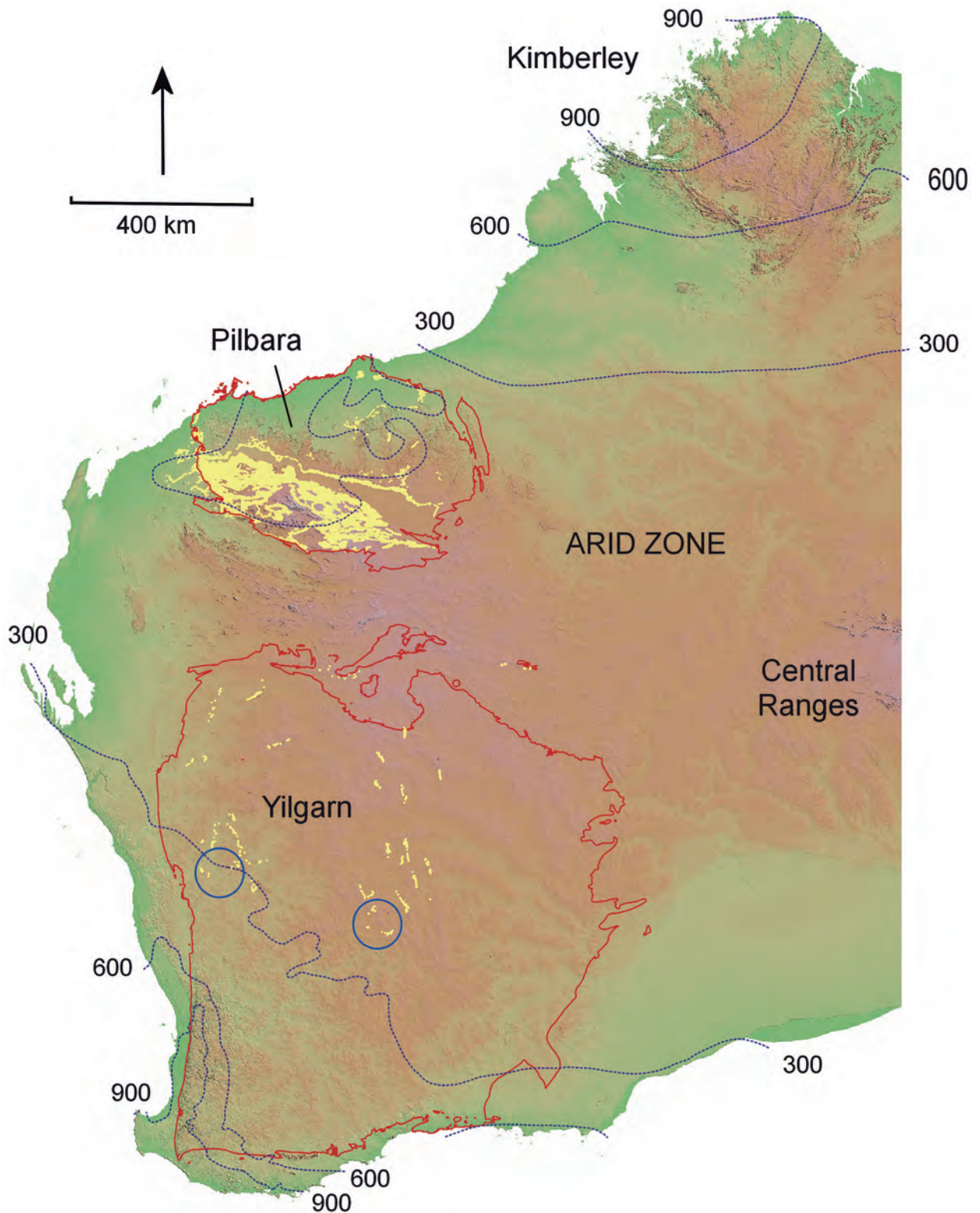


Figure 1 - Location of Yilgarn and Pilbara cratons in Western Australia. Areas of BIF shown in yellow, distribution in the Pilbara based on 1:250000 mapping, in the Yilgarn only ranges sampled are shown due to lack of uniform mapping. The locations of the two hotspots of BIF specialist richness in the Yilgarn are shown by blue circles. Craton boundaries are in red; isohyets at 300 mm intervals in black; the background digital elevation model shows lowlands in green and uplands in browns to purples.



Figure 2 - Yilgarn BIFs. A) Close up of BIF outcrop showing the highly deformed nature of the Yilgarn BIFs at very fine scale. Scale bar 5 cm. B) Jasper Hill BIF was dominated by shrublands on the range and eucalypt woodlands on lower slopes and flats. Vertical orientation of banding indicates landscape scale deformation. C) *Spartothamnella* sp. Helena & Aurora Range (PG. Armstrong 155-109) (Family:Lamiaceae), a BIF specialist currently under taxonomic review. Scale bar 5 mm. Images a: A. Markey; b: S. Dillon; c: K. Thiele.

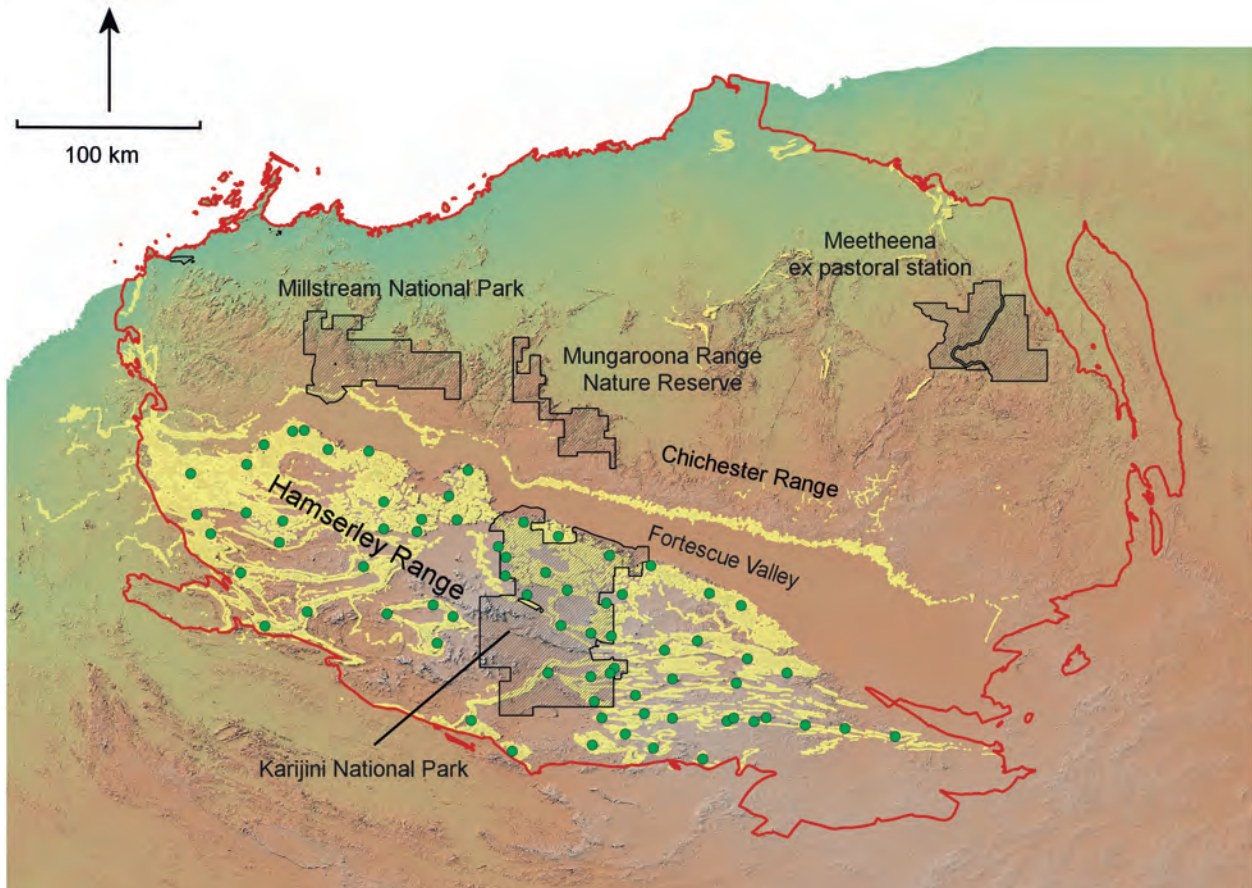


Figure 3 - BIF in Pilbara shown in yellow, location of plots sampled (green dots) and major conservation reserves (outlined). The Hamersley Range is the extensive mountain system south of the Fortescue Valley with the Chichester Range occurs to the north. Simplified craton boundary in red; the background digital elevation model shows lowlands in green and uplands in browns to purples.

Here, we compare the patterns of the flora and vegetation found on the Yilgarn ranges with those found in a survey covering 72 mountain tops in the Hamersley Range in the Pilbara (van Leeuwen & Bromilow 2002). Herbarium records indicate the Hamersley Range has a flora of 1385 taxa, 818 of which occur on areas mapped as BIF. The Hamersley Range is a vast anastomosing expanse of BIF extending east – west for 400 km and north – south for 120 km and occupies most of the southern Pilbara Craton (Figure 3). It is topographically much more diverse than the Yilgarn ranges, with a steep escarpment along the northern boundary and it is separated from the predominately volcanics of the Chichester Range by the Fortescue Valley (Figure 4a). The northern part of the Pilbara Craton is covered by granitic basement rocks and is surrounded to the north and east by sandy deserts, to the west by the sea and to the south by highly metamorphosed rocks. The region experiences a tropical semi-arid climate with an episodic and erratic summer rainfall derived largely from tropical depression and cyclonic systems (van Etten 2009).



Figure 4 - Pilbara BIFs. A) Northern escarpment of Hamersley Range looking south from the Fortescue Valley, note horizontal bedding of the BIF. B) *Callitris glaucophylla* (Family: Cupressiaceae) on fire protected tops of major cliff and gorge systems in the Hamersley Range. C) *Astrotricha hamptonii* (Family: Araliaceae), a BIF specialist on BIF outcrop in Karijini National Park. Images S. van Leeuwen.

In a survey of the Pilbara, a 50 x 50 m plot was established on each of the 72 upland areas close to the summit across the range and sampled on two occasions (Figure 3). In each plot all vascular plants found were recorded, along with a standard site description and a GPS fix. The Yilgarn study was based on sampling ca. 50 plots on each of 24 ranges, with the 20 x 20 m plots being sampled once. Data analysis methods are detailed in Gibson *et al.* (2012) and excluded annual species for some analyses.

Life forms and dominant families

The life forms found on the BIFs of the Pilbara show an increase in dominance of perennials compared to the Yilgarn (Figure 5). Shrubs are the most common life form in both regions while the Pilbara shows decreasing proportion of annual herbs, geophytes and annual grasses with relative increases in the importance of perennial herbs, trees, perennial climbers and parasites and hummock

grasses. This change in life form composition is likely to be driven by the differences in climate between the two regions (predominately winter rainfall in the Yilgarn and summer rainfall in the Pilbara) as similar patterns of dominance are seen on other substrates in the Pilbara. In terms of vegetation structure the most obvious difference is the dominance of perennial *Triodia* hummock grasslands across the Pilbara, which, with few exceptions is uncommon on the BIFs of the Yilgarn.

The overall composition of the flora in terms of its best represented families also shows some differences (Figure 6). The Asteraceae and Fabaceae are the most speciose families in both areas, with similar proportions of the Myrtaceae and Poaceae. The Malvaceae is, however, much more speciose, and the Chenopodiaceae much less speciose, in the Pilbara compared to the Yilgarn. Increase proportions of Goodeniaceae, Amaranthaceae and Solanaceae are also evident in the Pilbara.

Species richness and turnover

In the Yilgarn, some 62% of taxa were found in less than 10% of plots (120 plots), and a similar proportion was found in the Pilbara with 58% of taxa recorded in less than 10% of the plots (7 plots). This indicates rapid turnover in the species composition across both the Yilgarn

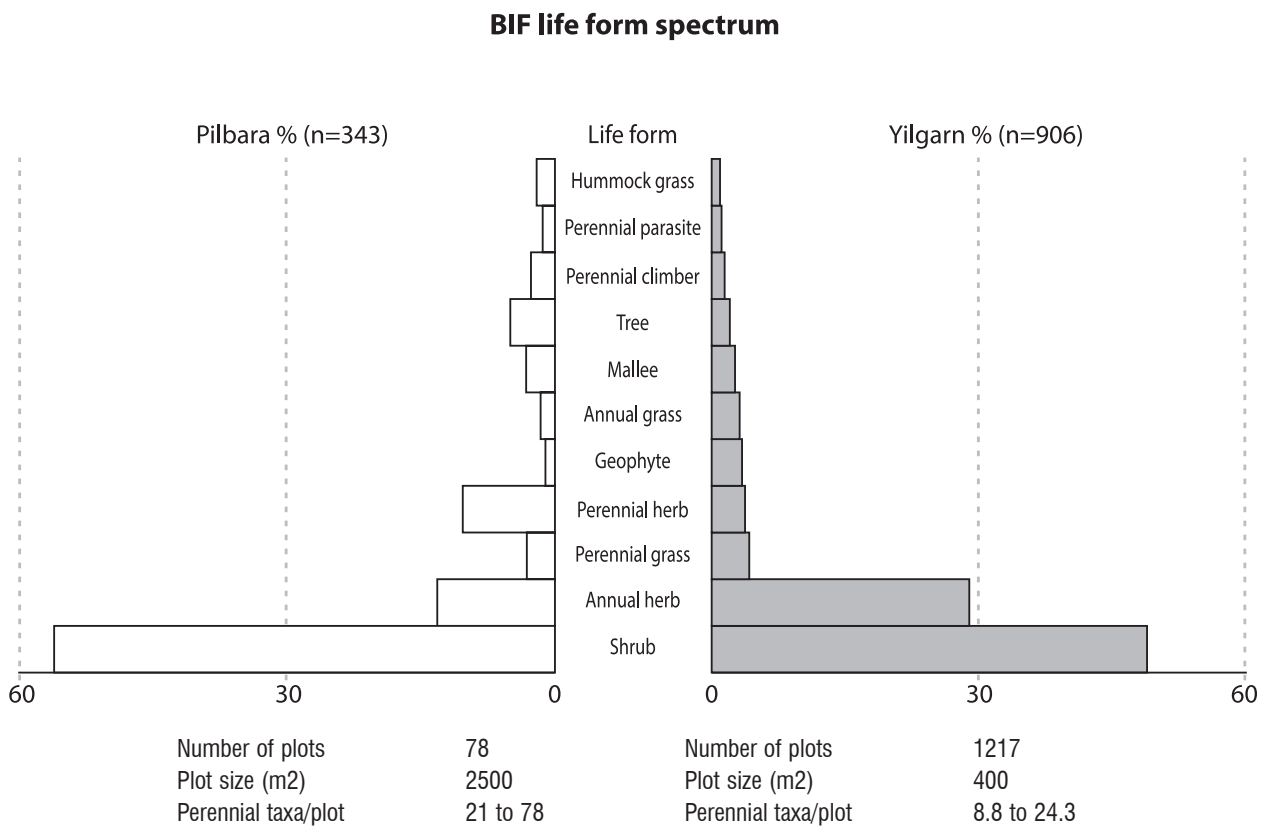


Figure 5 - Life forms of BIF floras occurring at frequencies of > 1% in the Yilgarn and Pilbara. Perennial taxa per plot represents mean per range in the Yilgarn and maximum and minimum per plot in the Pilbara; n is number of taxa recorded.

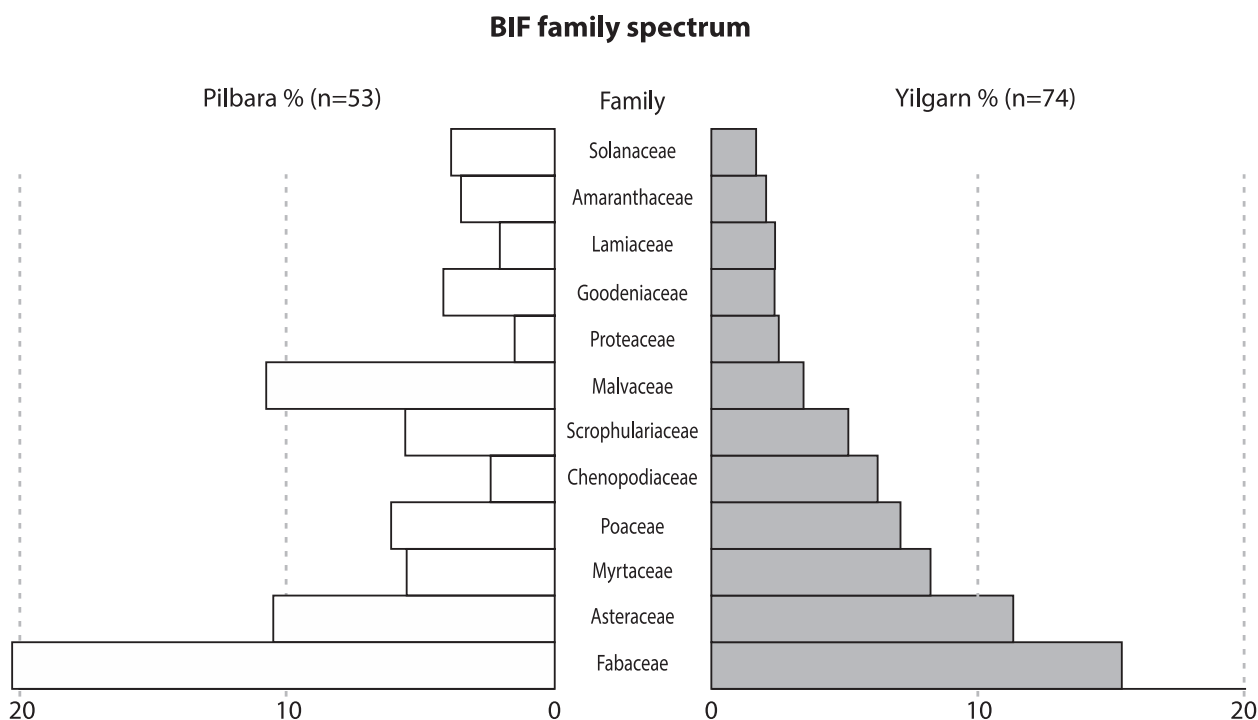


Figure 6 - The percentage of florals of the ten most common families in the Yilgarn and Pilbara BIFs; n is number of families recorded.

and the Pilbara BIFs. Another measure of beta diversity was developed by Baselga (2010, 2012) extending the Sørensen dissimilarity measure to cover multiple sites (β_{Sor}), which can be decomposed into components related to turnover (β_{SIM}) and nestedness (β_{SNE}). Both the Yilgarn and Pilbara show similar patterns of high turnover, with the turnover in the Yilgarn being slightly greater than that recorded for the Pilbara (Table 1). The high level of species turnover in both the Yilgarn and the Pilbara is of the same order as that recorded in the species rich *Banksia* woodlands of the highly diverse southwest of Western Australia (Gibson, unpublished data).

In the Yilgarn, spatial, soil chemistry and climate attributes individually explained between 25 and 49% of variation in perennial richness and, with inclusion of site variables, explained a total of 60% of the variability in species richness (Figure 3a in Gibson *et al.* 2012). In the Pilbara soil chemistry, climate and spatial attributes failed to explain the variation in perennial species richness.

Similarly, models of perennial species composition in the Pilbara had poor explanatory power. Significant vectors were determined by forward selection of climate (isothermality, temperature seasonality), soil chemistry (Ca, Mg) and spatial data (9 vectors) but these explained only 8 % of the total variance. Altitude had no explanatory power in terms of species composition. In contrast, the Yilgarn models for species composition accounted for 34% of the total variance (Gibson *et al.* 2012).

Table 1 - Partitioning of Sørensen multiple site dissimilarity measure (β_{SOR}) into components related to turnover (β_{SIM}) and nestedness (β_{SNE}) following Baselga (2010, 2012). Datasets from the Pilbara (72 plots), combined Yilgarn ranges (1217 plots) and the SW *Banksia* woodlands (134 plots) used a resampling procedure to standardise sample size to 50 plots.

	β_{SOR}	β_{SIM}	β_{SNE}
Yilgarn individual ranges	0.943– 0.956	0.926 – 0.943	0.007 – 0.019
Yilgarn combined ranges	0.961	0.948	0.014
Pilbara	0.944	0.928	0.017
SW <i>Banksia</i> woodlands	0.952	0.939	0.012

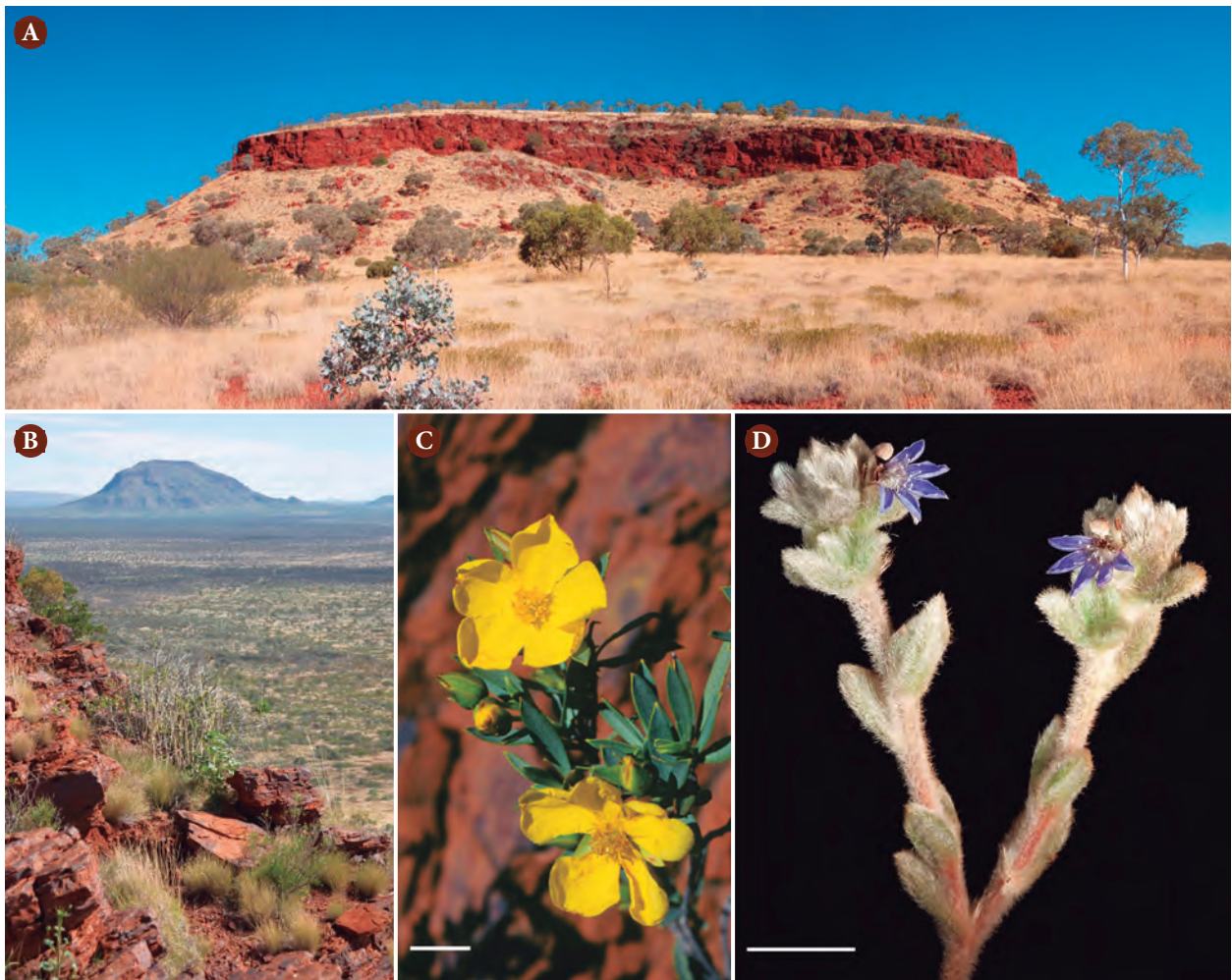


Figure 7 - Pilbara BIFs. A) Flat topped mesa found in Karijini National Park in central Pilbara. B) View toward Mt Bruce, the second highest peak in the Hamersley Range. C) *Hibbertia glaberrima* (Family: Dilleniaceae), a BIF specialist of the Pilbara. Scale bar 10 mm. D) *Scaevola* sp. Mt Nameless (PAS Wurm 1443) (Family: Goodeniaceae), a BIF endemic restricted to a single mountain top. Scale bar 10 mm. Images a,b,c: S. van Leeuwen; d: K. Thiele.

Taxa centred on BIF

Forty-four species are known to be endemic to, or have their centres of distribution centred on the BIF ranges of the Yilgarn (here referred to as BIF specialists) (Figure 2c). When the spatial distribution of these species were plotted on a quarter degree grid (15' x 15') two concentrations of these BIF specialists were found both along the Arid Zone boundary (roughly the 300mm rainfall isohyet in the south west (Byrne *et al.* 2008)) that separates the species rich woodlands and shrublands of the south west from the sparser vegetation of the interior (Figure 1) (Gibson *et al.* 2012).

A list of species from the Pilbara whose distributions are restricted to, or centred on, BIF was similarly compiled from a variety of sources and checked against the distribution information currently held in the Western Australian Herbarium. A total 66 BIF specialists were identified, 20 of which appear to be endemic to BIF (Figures 4c and 7c&d, Appendix 1). The pattern in co-occurrence (number of species per quarter degree grid) of these Pilbara BIF specialists was examined using Western Australian Herbarium records and survey data. As in the Yilgarn, the BIF specialists are concentrated in specific areas, in this case in the central and eastern Hamersley Range (Figure 8).

Partitioning of the variance of the richness of BIF specialist found in the Pilbara dataset (38 of the 60 taxa occurred in 72 plots) showed that altitude was the most important factor (accounting for 41% of the total variance, and 12% of variance not accounted for by other factors), soil chemistry (Mg and Ca) accounts for a further 6% of the variance, and the climate variable (maximum temperature of the warmest month) explain no unique variance (Figure 9). In all, the model accounted for 43% of the variance in BIF specialist richness. This is consistent with the species mapping that showed the concentration of BIF specialist occurring in the highest part of the Hamersley Range (Figure 8). In the Yilgarn spatial location, soil, climate and site variables explained 34% of the variance in specialist richness with no single factor dominating (Figure 4 in Gibson *et al.* 2012).

Fauna

Invertebrates

One of the most remarkable discoveries on Western Australian biodiversity in recent years has been the diverse subterranean invertebrate fauna of troglobites (organisms residing in air filled voids called vugs) and stygobites (organisms residing in water filled voids) predominately comprising hexapods, arachnids, myriapods and crustaceans (Humphreys 1990, 1993; Harvey *et al.* 1993; Humphries 2008; Harrison *et al.* 2014) (Figure 10). Phylogenetic studies on the stygofauna (Leys *et al.* 2003; Cooper *et al.* 2002; Cooper *et al.* 2007) have found that it is characterised by many short range endemics (Harvey 2002) restricted to aquifers formed in unconsolidated

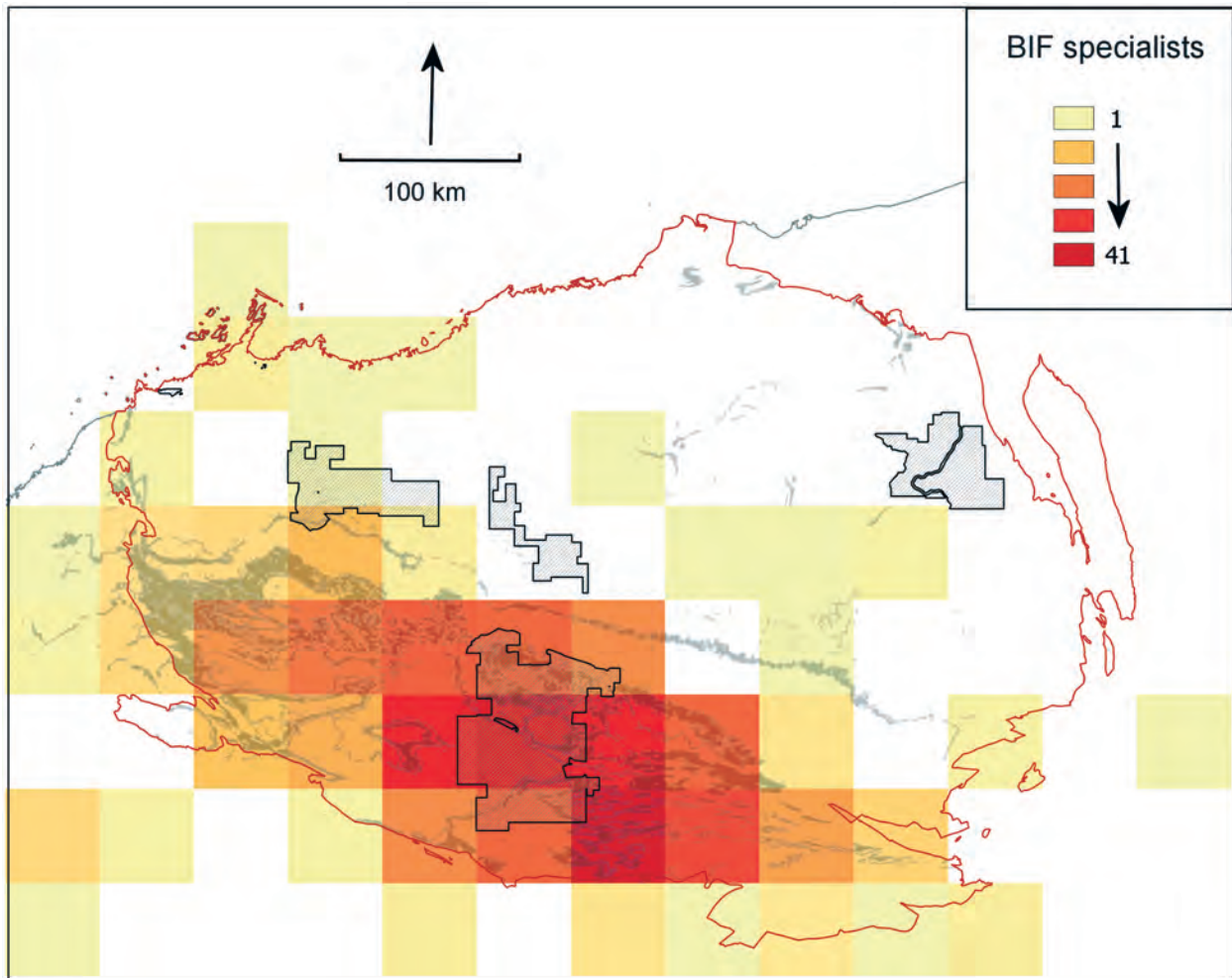


Figure 8 - Number of Pilbara BIF specialists (taxa endemic to, or with distributions centred on, BIF) per quarter degree grid cell. Cells with highest concentration overlap Karijini National Park. Major conservation reserves outlined as in Figure 3; boundary of a simplified Pilbara craton in red; 1:250000 BIF mapping shown in grey.

sedimentary sequences, calcrete, karstic, and fractured rock (Halse *et al.* 2014). While groundwater drawdown and changes in water quality associated with mining and pastoral diversification can have significant impacts on stygofauna (Halse *et al.* 2014), the discussion here concentrates on the biology of the troglofauna in the Pilbara BIFs.

Troglobites are believed to have evolved from a Tertiary rainforest litter fauna following the aridification in the mid-Tertiary (Humphries 2008; Byrne *et al.* 2008), they mainly occur in the vadose zone of calcrete aquifers and in voids in fractured rock in the Pilbara and Yilgarn (Harvey *et al.* 2008; Harrison *et al.* 2014). The taxonomy and distribution of the troglofauna in the Pilbara are still poorly known with 549 taxa being recorded from surveys covering <1% of the region (Halse and Pearson 2014). The state of knowledge of the troglobites in the Yilgarn is even less well developed. It is likely that the recent estimate of a troglofauna approaching 960 taxa for the western half of Australia is conservative (Guzik *et al.* 2010).

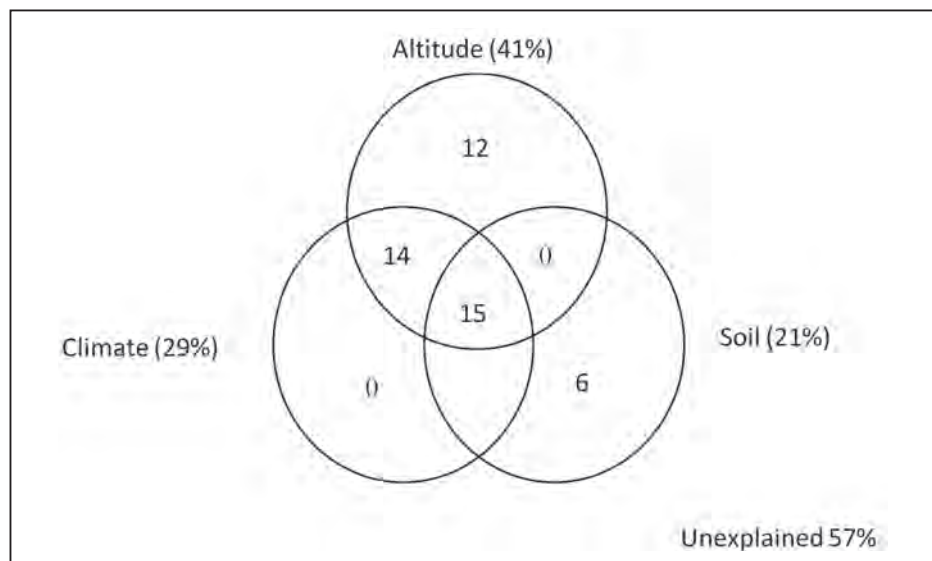


Figure 9 - Partitioning of the variation in perennial richness of the Pilbara BIF specialists using altitude, soil and climate datasets. The enclosing rectangle indicates the total variation in specialist richness, the circles within represent the proportion of the variation attributable to the different datasets. The unique and joint contributions of each dataset are shown in the figure. Total variation explained independently by each datasets is shown in brackets.

Early collections in Western Australia came from limestone cave systems (Harvey 1988) but, in mid 2007 a BIF troglofauna came to public notice with the discovery of troglobites in the Robe River valley in the Pilbara. Several Channel Iron Deposit mesas, some of which had been mined and others proposed for mining, were found to harbour a diverse troglobitic fauna in numerous internal vugs and fissures (Harvey *et al.* 2008). Early-mid Miocene erosion of Archean / Proterozoic BIFs had produced Channel Iron Deposits from which these mesas were formed by later erosion. Molecular analysis of the schizomids (pseudo-scorpions) revealed a series of short range endemic taxa each specific to an individual mesa (Harvey *et al.* 2008). Initially, a \$12b mining proposal was deemed not environmentally acceptable based on anticipated impacts to this troglobiotic fauna, but mining later proceeded following further definition of the schizomid's habitat and a redesign of the mine plan (SMH 2007; Majer 2009; Piper 2009).

Much less work has been done on troglobites compared with stygofauna over the last two decades, largely as result of the much more difficult sampling methodology needed (i.e. baiting of bore holes for some weeks and / or scrapping (Halse & Pearson 2014)). Nonetheless, a recent molecular study on schizomids across the Yilgarn and Pilbara has shown strong geographic structuring in subterranean taxa consistent with short range endemism, as has been found in the stygofauna (Harrison *et al.* 2014).

Recent regional survey work on other invertebrate groups in the Pilbara has shown compositional patterns consistent with major geological surfaces for the ground dwelling spiders (Durrant *et al.* 2010) and beetles (Guthrie *et al.* 2010) with distinctive faunas occurring on the BIFs. Much of these faunas are yet to be described and no detailed genetic studies on phylogenetic patterns are yet available.

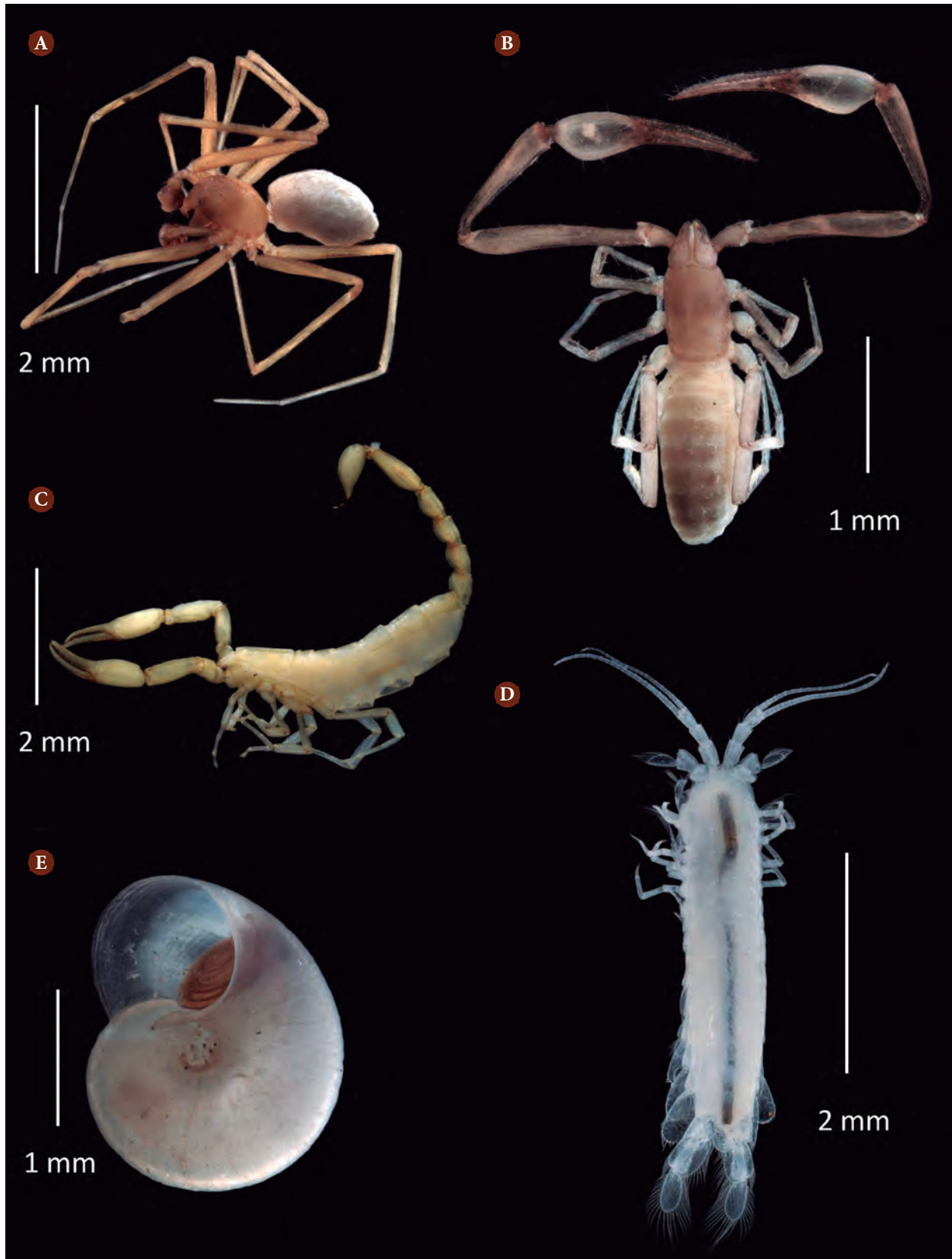


Figure 10 - Examples of Pilbara invertebrate troglobites (A, B, C) which live in air filled voids and stygobites (D, E) which live in water filled voids. A) Spider (Linyphiidae); B) Pseudo-scorpion (*Indohya* sp.); C) Scorpion (undescribed genus); D) Crustacean (*Mangkurtu kutjarra*); E) Snail (Hydrobiidae). Images J. McRae, Bennelongia Environmental Consultants.

Vertebrates

While no recent regional studies have been undertaken on vertebrates occurring on the BIFs of the Yilgarn considerable work has been undertaken in the Pilbara (McKenzie *et al.* 2009). The Pilbara is known to be an area of high biotic diversity and endemism for reptiles (How & Cowan 2006; Powney *et al.* 2010; Doughty *et al.* 2011) with many saxicole (rock-loving) endemics. Patterns in species composition for both mammals and reptiles are strongly linked to surface geology but compositional patterns showed no uniquely BIF assemblages (Gibson & McKenzie 2009; Doughty *et al.* 2011). This belies the finer scale patterns shown by a number of reptile species and species complexes in the region (Pepper *et al.* 2013; Maryan *et al.* 2014).

The Pilbara has the highest species richness of geckoes of any area in Australia (Powney *et al.* 2010) and the taxonomy of this group is yet to be fully resolved. In a phylogenetic study of the gecko *Lucasium stenodactylum*, Pepper *et al.* (2008) found five major clades whose distribution closely matched surface geology. In an expanded study that included a further six co-distributed species a strong north – south genetic differentiation across the craton boundary was confirmed as a major subdivision, and further subdivision within the Pilbara between the Hamersley Basin (primarily BIFs of the Hamersley Range) and volcanics and granites of the north, reflecting the compositional patterns reported for the ground dwelling spiders and beetles (Durrant *et al.* 2010; Guthrie *et al.* 2010).

Genetic and morphological studies have also identified a southern lineage in the large varanid lizard of the Pilbara, which is now considered endemic to the BIFs (Maryan *et al.* 2014). Pepper *et al.* (2013) undertook a similar analysis into the geckos of the widespread *Heteronotia spelea* complex that occurs in the Pilbara and central Australian ranges. This resolved three taxa, one confined to the central ranges, a localised endemic in the northern Pilbara and a third more widespread taxon in the Pilbara. This third taxon does, however, have further phylogenetic structure reflecting a south eastern (BIF) lineage and other lineages in the south west and north east.

While reptile fauna of the Pilbara shows classic examples of vicariance and ecological diversification across an ancient and heterogeneous landscape (Pepper *et al.* 2008, 2013), this may not be the case for all vertebrate groups (Lanier *et al.* 2013).

Connectivity and Dispersal

Banded Iron Formations are topographical features that in many cases can behave as terrestrial islands. Although less conspicuous topographic habitats than some terrestrial islands BIF typically vary considerably in size and degree of spatial disjunction. This makes them ideal model systems for investigating the importance of connectivity or isolation, and evolutionary processes, such as gene flow, in shaping population genetic structure, phylogenetic divergence and speciation.

Work to date has concentrated on a small number of BIF endemics that are currently or potentially being impacted by mining operations. The few studies available have highlighted the limited but variable levels of connectivity and gene flow, and persistence of the flora and fauna related to specific habitats. A genetic study of four leafless *Tetratheca* taxa (Family: Elaeocarpaceae) that are largely restricted on massive BIF outcrops on four adjacent ranges found deep phylogenetic divisions between taxa. It seems that this life form has evolved independently on at least three separate occasions, and that restriction to small disjunct BIF outcrops within the same geographic area is a result of *in situ* speciation following long isolation (Butcher *et al.* 2007). A parallel demographic study showed three taxa to be restricted to a very specific habitat type, principally deep rock fissures capable of holding enough moisture to ensure survival through long dry summer where surface rock temperature are likely to exceed 50° C. Successful establishment of these taxa appears dependent on the occurrence of both good winter and summer rainfall, an infrequent sequence of events in this environment. As a consequence the viability of extant populations is largely dependent on maintenance of adult reproductive plants (Yates *et al.* 2011).

Other more detailed genetic studies on BIF endemic plant species have shown significant genetic structure over relatively small distances, with historically low gene flow in the case of *Tetratheca paynteri* subsp. *paynteri* (Butcher *et al.* 2009) and more extensive gene flow in *Acacia woodmaniorum* (Family: Fabaceae) (Millar *et al.* 2013; 2014). In both cases small isolated populations were found to have significant conservation value, while different pollinators and pollinator syndromes are likely to be key factors in the patterns of connectivity and gene flow between populations.

In *Tetratheca paynteri* subsp. *paynteri*, a BIF endemic with a total distribution of ca. 4 ha, it was found that gaps between 80 – 120 m constituted effective barriers to gene flow. Extremely restricted pollen dispersal largely within 3 m, and predominantly near neighbour mating, maintained the strong genetic structuring of populations over these distances (Butcher *et al.* 2009). Native bees of four *Lasioglossum* species have been observed buzz-pollinating *T. paynterae* and three of these species carried virtually only *Tetratheca* pollen (Butcher *et al.* 2009). It appears that these pollinators limit their movement to local clusters of plants and that they are largely specific to *Tetratheca paynteri* subsp. *paynteri* on these ironstone cliffs. Historically low gene flow and long term persistence have been reported previously from plants restricted to inselbergs in Australia (Yates *et al.* 2007; Byrne & Hopper 2008; Tapper *et al.* 2014a, Tapper *et al.* 2014b) and elsewhere (Sarhou *et al.* 2001; Pinheiro *et al.* 2014), indicating the ancient and highly isolated nature of these systems.

In contrast, analysis in *Acacia woodmaniorum* shows genetic connectivity was maintained by pollen mediated gene flow over extensive dispersal distances through a range of generalist insect pollinators, including ants, moths, wasps, beetles and bees (Millar *et al.* 2014). Despite the limited distribution of < 40 km² and gene flow, significant genetic structure was detected in *A. woodmaniorum*. While there was sufficient gene flow to maintain ‘adaptive connectivity’ there was significant differentiation across different ridges and between different populations on the same ridge (Millar *et al.* 2013). A quadratic relationship between genetic differentiation and

geographic distance suggested limitation to gene flow occurred at around 740 m (Millar *et al.* 2013). Significant gene flow and high levels of outcrossing are important features that may be critical for the persistence and conservation of this species in a series of large and small disjunct populations over a narrow geographic range. As long as this population system remains intact, this species is likely to persist, even as small populations, over significant historical timeframes (Millar *et al.* 2013).

A number of phylogenetic and phylogeographic studies have been carried out on both invertebrates and vertebrates endemic to Western Australian BIF and these show deep and ancient phylogenetic splits among population groups within currently defined species (see next section). However, only one study to date has combined phylogeographic investigations with more fine scale genetic structure within a species. The millipede *Atelomastix bamfordii* is restricted to the same five adjacent BIF ranges (Nistelberger *et al.* 2014) where the different species of the leafless *Tetratheca* occur (Butcher *et al.* 2007). A genetic study of the millipede across these ranges revealed strong mitochondrial DNA based phylogeographic structuring and strong differentiation using nuclear microsatellites with a lack of correlation between genetic divergence and geographic distance. This suggests there has been little or no contact between the populations following their separation, emphasising the role of genetic drift in driving population differentiation (Nistelberger *et al.* 2014).

Pattern and evolutionary processes

The floristic patterning seen on the BIFs of the Pilbara and Yilgarn are surprising similar despite starkly contrasting climates and landscapes sharing few taxa. Both are dominated by arid zone floras with broadly similar dominant families (major differences being the Malvaceae are more common in the Pilbara and Chenopodiaceae are more common in the Yilgarn), and with perennial life forms become more dominant in the Pilbara.

Analysis of beta diversity in perennial plant species suggested that turnover, although high, is lower in the Pilbara than in the Yilgarn. This may just be related to the more restricted sampling of the summit areas in the Pilbara rather than covering the whole catenary sequence of the ranges as was done in the Yilgarn. Similarly the lack of success in modelling species richness and composition in the Pilbara may be related to sampling, but may also reflect poorer climate estimates (due to lack of climate stations) and the more contiguous nature of the BIF in the Pilbara.

Patterns in richness of BIF plant specialists in the Pilbara was largely driven by altitude, but this factor was not identified as being important on the more subdued ranges in the Yilgarn. The much large area of the BIF in the Pilbara may be the reason for the higher number of BIF specialist identified (66 cf. 44 in the Yilgarn) although the proportion of BIF endemics is lower (30.3% cf. 58.3%). The high species turnover recorded in the species rich southwest, on the BIF ranges of the Yilgarn, and now in the Pilbara, must in part reflect the age of these landscapes.

Phylogenetic studies on the fauna and the flora likewise suggest that the pattern of diversity seen on the BIFs, and across the Australian arid zone more generally, is intimately linked with the long evolutionary time periods over which this landscape has evolved and climatic vicissitudes it has undergone (Byrne *et al.* 2008). The aridification of Australia began in the mid Miocene (15 Ma) when a warm rainforest environment began to dry, with a period of increased aridity and regional instability with massive erosion across the landscape in the late Miocene (10-6 Ma). Warmer mesic conditions returned at the beginning of the Pliocene (6-2.5 Ma) followed by progressive expansion of the arid zone and formation of the stony deserts ca. 4-2 Ma (Fujioka *et al.* 2005). Climatic oscillations consistent with glacial cycles began during the Pliocene but were accentuated from the mid Pleistocene (~1Ma) with the mobile dune systems forming ca. 1 Ma when the climatic cycles increased in amplitude from 40 ky to 100 ky (Byrne *et al.* 2008; Fujioka *et al.* 2009). The BIFs of the Yilgarn, Pilbara and the ranges of the Kimberley and central Australia are hypothesised to have provided mesic refugia for the biota in face of increasing aridity (Byrne *et al.* 2008), and the formation of the vast sand dune systems of inland Australia would have increased the isolation of these areas. These BIFs would have acted as terrestrial islands with long term isolation driving phylogenetic divergence among even geographically close BIF and also within BIF structures through subterranean islands (see Harrison *et al.* 2014).

Little phylogenetic information is available on BIF endemic plant species or species associated closely with BIF. Morphological and phylogenetic studies on highly localised *Tetradthea* taxa suggests diversification occurred with aridification in the Miocene (6-7 Ma), with independent evolution of separate lineages among the leafless BIF endemics on adjacent ranges (Crayn *et al.* 2006, Butcher *et al.* 2007). While not a BIF specialist, phylogenetic and paleodistribution reconstruction studies on taxa in the *Callitris columellaris* complex indicates that multiple distinct lineages have evolved in regional uplands, such as the Yilgarn and the Pilbara BIFs. This *Callitris* species complex is thought to have persisted in long-term refugia probably across multiple climatic cycles during the late Pleistocene (Sakaguchi *et al.* 2014). Similar deep phylogenetic patterns are likely to be found in a number of taxa and genera that show major range disjunctions, for example between the Pilbara and the Central Ranges (*Hibbertia glaberrima*, Dilleniaceae; *Eucalyptus lucens* (Myrtaceae), the Pilbara and southern Australia (*Eucalyptus ewartiana*) and the Pilbara and northern and / or eastern Australia (*Astrotricha*, Araliaceae; *Pleurocarpaea*, Asteraceae; *Maytenus* Celastraceae).

More phylogenetic data is available for the fauna and it also points to an ongoing evolution dating from the Miocene aridification with overlying temporal patterns relating to isolation and persistence. Phylogenetic analysis of troglobitic schizomids shows multiple subterranean clades nested within surface lineages, implying multiple invasions of subterranean voids by surface ancestors and persistence in, and reliance on, multiple localised refugia through several glacial cycles (Harrison *et al.* 2014). Similar patterns have been reported for stygofauna, where radiation is thought to have occurred between 3-9 Ma for diving beetles (Leys *et al.* 2008) and between 4.1-13.4 Ma for amphipods (Cooper *et al.* 2007). More recent patterns of divergence are evident for

the millipede *Atelomastix bamfordii* with persistence and isolation on BIF resulting in significant genetic divergence among populations estimated at around 0.7 – 1.1 Ma in the Pleistocene (Nistelberger *et al.* 2014). Again these findings are consistent with known increases in aridity at that time (Byrne *et al.* 2008).

More complex patterns are apparent in the gecko *Lucasium stenodactylum*. The initial split between Pilbara and non Pilbara lineages has been dated at 16-27 Ma, in the early Miocene. Present day Pilbara lineages are younger (3-4.5 Ma) and have specific substrate preferences. Intra-clade ages are estimated at 0.8-2.4 Ma consistent with the increased aridity leading to the formation of the mobile sand sheets and show isolation by distance at scales of < 90 km (Pepper *et al.* 2008). Other geckos also show a genetic imprint of the Tertiary climatic change with divergent lineages also closely correlated with geological and topographic features at both a large geographic scale and also at fine within BIF scale (Pepper *et al.* 2013). The gecko *Heteronotia* shows Kimberley versus Pilbara – central Australian ranges split at about 4.2 Ma, followed by a split between central ranges and Pilbara at 2.9 Ma (and perhaps older) predating the formation of the sand dune system (Pepper *et al.* 2011). Overall the complex evolutionary patterns and very high diversity in the Pilbara gecko taxa suggest that the Pilbara BIF and associated uplands have been important places for persistence of these groups during the Pliocene and Pleistocene (Byrne *et al.*, 2008; Pepper *et al.*, 2008, 2011; Oliver and Bauer 2011), with evolutionary divergence also driven by vicariant processes in association with regional habitat differences (Pepper *et al.* 2013).

Other reptile groups, such as skinks (Rabosky *et al.*, 2007), agamid lizards (Hugall *et al.*, 2008) and typhlopoid snakes (Marin *et al.* 2013), show similar patterns to the geckos with phylogenetic studies finding that diversification concurrent with the expansion of open and arid environments since the Miocene, with multiple invasions (< 10 Ma) of the arid zone followed by recent radiation (< 5 Ma). In all these cases, rocky uplands such as the Pilbara BIF functioned as terrestrial islands with climatic stability enabling persistence and greatly facilitating *in situ* diversification and divergence among lineages even over relatively short geographic distances.

These patterns of deep phylogenetic divisions, fragmented distributions, high beta diversity and historic low gene flow identified in the Pilbara and Yilgarn, can also be found in the highly diverse flora of south western Australia, and are likely to have resulted from the ancient nature of these landscapes and their evolution through millions of years of climatic change not experienced by the biota of the youthful landscapes of the northern hemisphere (Coates 2000; Hopper 2009). The genetic imprint of historically climatic cycles is apparent in many south western taxa (Byrne 2008), including both common and rare endemics of the granite outcrops that would have acted as localised Pleistocene refugia similar to the BIFs (Byrne and Hopper 2008; Tapper *et al.* 2014a, 2014b). Evolution of the BIF flora and fauna, while constrained by the geology, was largely a result of both long term environmental stress and stochastic processes that were not confined to these systems (Yates *et al.* 2007; Hopper 2009).

Mining

The oldest mine in Australia, which predates European settlement, occurs on BIF in the Yilgarn. In the Weld Range at Wilgie Mia, red and yellow ochre was mined in large quantities by the Aboriginal people for perhaps several millennia. Davidson (1952) believed that most of the red ochre used in the western deserts came from this mine, which was surprisingly large (50–100 feet wide x 65 feet deep) and had been laboriously excavated with very simple technology, with further tunnelling following the ochre seams. This pigment was held in very high regard for both ceremonial purposes and for use in rock art sites. Ellis (1982) considered that the deposit formed from the weathering of a large jaspilite lens. The site was mined by Europeans between 1945 and 1978 and is today protected in a gazetted reserve and represented on the National Heritage List.

In more recent times, world demand for iron ore has undergone a massive increase due to demand from China, with Brazil, China and Australia being the major producers. Australian production of iron ore is centred on large open cut BIF mines in the Pilbara. In 2012, Australia produced 520 Mt of ore, of which 94% came from Western Australia, with most of this coming from the Pilbara (92%) (Armitage 2013; Department of Mines & Petroleum 2013). The majority of the ore produced to date has been haematite, while exploitation of the massive magnetite resources has only just commenced due to the much higher processing costs. Mining in the Pilbara and Yilgarn is very different in terms of scale, with the deposits in the Yilgarn being small and scattered (to 25 Mt) compared to the very large mines (to 1.8 Gt) in the Pilbara (Government of Western Australia 2007, Morris & Keenshaw 2011). Pilbara operations have much larger economies of scale compared to the Yilgarn (Table 2, Figure 11).

Table 2 - Mining statistics for iron ore production in 2012 in Western Australia. Most of the iron ore production is centred on large open cut mines in the Pilbara. Employment figures related to direct employment by the mining companies (Department of Mines & Petroleum 2013).

	Mines	Production (Mt)	Production (%)	\$AU (million)	Employment
Kimberley	3	5.7	1.2	607	917
Yilgarn	8	17.3	3.6	1,851	2,366
Pilbara	28	453.2	95.2	48,563	26,730
Total	39	476.2		51,021	30,013

In Australia, mineral rights are owned by the Crown and almost all of the BIF geology in the Pilbara and the Yilgarn is under exploration tenements issued by the Western Australian Department of Mines and Petroleum. When a company has proven the value of a resource and wishes to apply for a mining lease, a Mining Proposal is submitted to the Department of Mines and Petroleum who evaluate the requirement for referral for environmental assessment based on

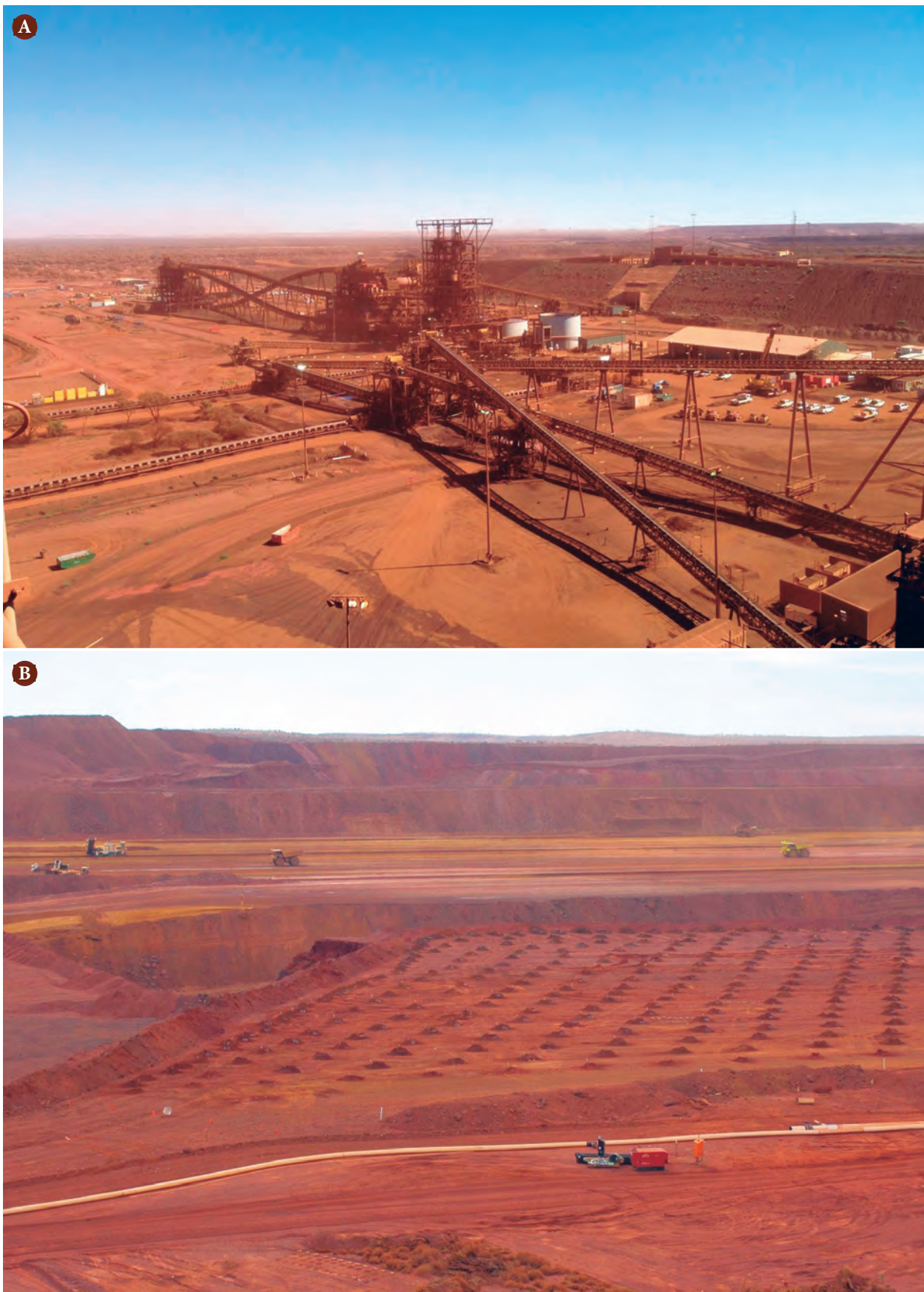


Figure 11 - Pilbara iron ore mining. A) Mining infrastructure Fortescue Metals Cloudbreak Mine. B) Pit at Fortescue Metals Cloudbreak Mine. Image S. Grein, Fortescue Metals.

a significance test on the nature, scale and duration of the impact, significance of the environment, availability of alternative processes for managing impacts, and degree of public interest. Proposals that are considered to be environmentally significant under these guidelines are referred to the Environmental Protection Authority (EPA) for consideration for assessment of impacts. The Office of the Environmental Protection Authority then set a level of assessment for the project based on the significance of the potential impacts. For large development proposals the level of assessment is normally set as a comprehensive evaluation known as a Public Environmental Review (PER). In consultation with the company, a scope document is developed for an environmental impact assessment that is undertaken under Part IV of the *Environmental Protection Act 1986* following a set of published procedures (Environmental Impact Assessment (Part IV Division 1 and 2) Administrative Procedures 2012). These procedures include a requirement to consult with stakeholders, provide sufficient information to allow informed comment to be made, evaluate options and alternatives, identify environmental factors likely to be impacted, identify best practical methods to avoid, where possible, and otherwise minimise, rectify, reduce, monitor and manage impacts of the proposal.

When the PER is finalised it is open for public comment for a period (generally 4 weeks) during which time the general public and other government agencies can make submissions to the EPA. The EPA is an independent authority appointed by the Government to provide advice to Government on a range of environmental issues. At the conclusion of the public comment period, the EPA prepares a public report and submits recommendations to the Minister for Environment. This report and the recommendations are then open to public appeal, the outcome of which is determined by the Minister for Environment. The Minister for Environment will then consider the EPA's report and any appeals, and determine, in consultation with other Ministers, whether the proposal should be allowed to proceed and if so under what conditions.

The conditions imposed on a development usually include addressing matters of: proposal implementation; time limit for proposal implementation; compliance reporting; and public availability of post-assessment information plus any environmental management commitments made in the Mining Proposal. Proposal-specific implementation conditions may also be applied. Generally proposal-specific conditions are outcome-based and may include provisions for 'offsets' to address any significant residual effects in order to achieve 'no net loss' of biodiversity (EPA 2013). Offset conditions are only imposed after higher order opportunities in the mitigation hierarchy (prevent / avoid; minimise / reduce; rescue / relocate; repair / restore) are considered not to satisfactorily reduce residual environmental impacts in line with the EPA's offset policy.

Small scale projects that are not likely to have a significant impact on the environment are not assessed by the EPA, but may be assessed through the provisions of the *Mining Act 1978* and Part V Division 2 of the *Environmental Protection Act 1986* that relates to the Clearing of Native Vegetation. The Federal Government's environmental agency may also become involved if the proposal is likely to impact on a Matter of National Environmental Significance (MNES) as defined by the national *Environment Protection and Biodiversity Conservation Act 1999*.

While the companies spend considerable resources in developing a detailed understanding of the impacts of their proposed developments on the flora and fauna of the areas in which they are working, the understanding of the broader scale patterns in the biota is often lacking due to generally inadequate biological information in these areas, making it difficult to set the new knowledge into a regional context. In order to provide this regional context the Western Australian and Federal governments, in collaboration with some major mining companies, have funded a number of regional surveys, either across a range of different plant and animal groups (McKenzie *et al.* 2009) or concentrating on a specific biotic group (Gibson *et al.* 2012). In the absence of this regional level information, there have been cases where assessment of development proposals has been delayed while further biological studies have been undertaken (SMH 2007; Majer 2009; Piper 2009).

Conservation issues

Recent reviews have highlighted the changes in the Pilbara biota due to pastoral use, changes in aboriginal burning practices and mining over the last 150 years (Woinarski *et al.* 2000; McKenzie *et al.* 2009). During this period fundamental alterations have occurred in vegetation patterns particularly on the richer alluvial soils and in the fauna assemblages, largely as a result of overgrazing, too frequent fires and the introduction of feral animals and plants. Some 15% of the original mammal fauna is now extinct, and serious exotic weeds, such as buffel grass (*Cenchrus ciliaris*) continue to spread and pose significant threat to the native biota. While pastoralism in the Yilgarn has not been as widespread in areas where BIF is prevalent, the collapse of the mammal fauna is common across the arid zone (McKenzie *et al.* 2007).

Although the mining industry has a small footprint compared to industries such as pastoralism, the complexity of the flora and fauna of this ancient landscape with short range endemic and cryptic taxa, and taxa with significant genetic differentiation over small geographic distances, coupled with the high beta diversity of the flora as a whole, inevitably results in difficult land use decisions. Areas of unusual geology can, not surprisingly, harbour unusual biotas. The deep phylogenetic divisions seen within both fauna and flora across short geographic distances suggest that species may not be the most appropriate unit of biodiversity to use when assessing potential impacts from mining proposals. Clusters of populations that represent discrete evolutionary lineages, and even genetically divergent populations, may be more appropriate units for conservation (*cf* Moritz 1994; Coates, 2000).

In the Yilgarn, attempts have been made to gain a strategic understanding of the areas of highest conservation value (Government of Western Australia 2007) to inform consideration of reservation of high value areas. The EPA (2013) has raised serious concerns about the cumulative impacts of developments on the Yilgarn BIFs in the context of achieving a balance between conservation and development and noted that none of the BIF ranges are protected in secure conservation reserve ('A' class or National Park) in the Yilgarn.

The reservation status of BIF in the Pilbara is significantly better than in the Yilgarn, as the Karijini National Park (627,422 ha) covers an extensive segment of the Hamersley Range incorporating the northern scarp, the uplands and a number of a deep gorge systems, and covers a significant range of vegetation types (Figure 4, 7a&b). While this park provides protection for a range of vegetation types, it is not representative of all the Pilbara BIFs given the high species turnover across this landscape.

The large scale of the open cut mines in the Pilbara, the ancient depauperate soils, and the arid climate, make rehabilitation a significant issue. It is estimated that 1200 km² has been mined in the last 20 years and will require rehabilitation (EPA 2013). In their assessment guideline the EPA note that perceived best practice rehabilitation often returns a low proportion of the pre-mined biodiversity values and improved rehabilitation outcomes across Western Australia will require significant investment in research and development of technology.

In the Yilgarn only one range system is in a Conservation Park (Class C) and various others are in ex-pastoral leases acquired by the Department of Parks and Wildlife and managed for conservation; however, these tenures do not exclude mining. Given the present land tenure and the high beta diversity of the ranges, Gibson *et al.* (2012) suggested that conservation management priority should be based on the patterns of BIF specialists that highlight areas where significant evolutionary processes are manifest. Unfortunately these are the same areas identified as the highest prospectivity for mining.

In the Pilbara the area of high co-occurrence of BIF specialists is partially covered by the Karijini National Park ensuring protection for some of this area (Figure 3). Significant progress has been made in developing landscape wide management priorities for threatened flora and fauna in the Pilbara, although full implementation will require substantial resources (Carwardine *et al.* 2014). Nevertheless, landscape wide management projects have commenced (e.g. Pilbara Corridors) and recent conditions applied to offset impacts of new mine developments are enabling a more strategic approach to addressing some threatening process in some areas. Further articulation of the biodiversity values of Pilbara BIFs should become evident through a strategic assessment of the cumulative environmental impacts of a 50 year plan for mining iron ore in the Pilbara that is currently being prepared by BHP Billiton Iron Ore.

In addition to the landscape scale processes described above, there is also significant concern regarding the likelihood of successful translocation, or reintroduction post mining, of some of the BIF endemics whose primary habitat is massive BIF outcrop. The landform changes incurred through post mining make it extremely unlikely that these endemics could be reintroduced given their very specific habitat requirements and demographic patterns (Yates *et al.* 2011).

While Government funded regional biological surveys (McKenzie *et al.* 2009; Gibson *et al.* 2012), detailed local surveys undertaken by proponents, and associated genetic studies, can provide the necessary biological data to make informed land use decisions, balancing the development and conservation interests will be challenging, and at times controversial, in these ancient landscapes given the long evolutionary history they encompass.

Acknowledgement

This paper is dedicated to Kieran McNamara (1954-2013) one time Director General of the Department of Environment and Conservation who had a lifelong commitment to achieving conservation outcomes for Western Australia and under whose tenure the regional surveys of the Yilgarn and Pilbara BIFs were undertaken. Margaret Byrne is thanked for her constructive comments on an earlier draft of the paper. Additional images were provided by J. McRae, Bennelongia Environmental Consultants; S. Grein, Fortescue Metals Group; A. Markey, S. Dillon, and K. Thiele, Department of Parks and Wildlife.

References

- Armitage, G. 2013. *Resource and energy statistics 2013*. Canberra: Commonwealth of Australia, Bureau of Resources and Energy Economics.
- Baselga, A. 2010. Partitioning the turnover and nestedness components of beta diversity. *Global Ecology and Biogeography*, 19: 134-143.
- Baselga, A. & Orme, C.D.L. 2012. Betapart: an R package for the study of beta diversity. *Methods in Ecology and Evolution*, 3: 808-812.
- Butcher, P.A.; McNee, S.A. & Krauss, S.L. 2009. Genetic impacts of habitat loss on the rare ironstone endemic *Tetratheca paynterae* subsp. *paynterae*. *Conservation Genetics*, 10: 1735-1746.
- Butcher, R. 2007. New taxa of 'leafless' *Tetratheca* (Elaeocarpaceae, formerly Tremandraceae) from Western Australia. *Australian Systematic Botany*, 20: 139-160.
- Butcher, R.; Byrne, M. & Crayn, D.M. 2007. Evidence for convergent evolution among phylogenetically distant rare species of *Tetratheca* (Elaeocarpaceae, formerly Tremandraceae) from Western Australia. *Australian Systematic Botany*, 20: 126-138.
- Byrne, M. 2008. Evidence for multiple refugia at different time scales during Pleistocene climatic oscillations in southern Australia inferred from phylogeography. *Quaternary Science Reviews*, 27: 2576-2585.
- Byrne, M. & Hopper, S.D. 2008. Granite outcrops as ancient islands in old landscapes: evidence from phylogeography and population genetics of *Eucalyptus caesia* (Myrtaceae) in Western Australia. *Biological Journal of the Linnean Society*, 93: 177-188.
- Byrne, M.; Yeates, D.K.; Joseph, L.; Kearney, M.; Bowler, J.; Williams, M.A.; Cooper, S.; Donnellan, S.C.; Keogh, J.S.; Leys, R.; Melville, J.; Murphy, D.J.; Porch, N.; Wyrwoll, K.H. 2008. Birth of a biome: insights into the assembly and maintenance of the Australian arid zone biota. *Molecular Ecology*, 17: 4398-4417.
- Carwardine, J.; Nicol, S.; van Leeuwen, S.; Walters, B.; Firn, J.; Reeson, A.; Martin, T.G. & Chades, I. 2014. Priority threat management for Pilbara species of conservation significance. Brisbane: CSIRO Ecosystems Sciences.

- Coates, D.J. 2000. Defining conservation units in a rich and fragmented flora: implications for the management of genetic resources and evolutionary processes in south-west Australian plants. *Australian Journal of Botany*, 48: 329-339.
- Cooper, S.; Bradbury, J.H.; Saint, K.M.; Remko, L.; Austin, A.D. & Humphreys, W.F. 2007. Subterranean archipelago in the Australian arid zone: mitochondrial DNA phylogeography of amphipods from central Western Australia. *Molecular Ecology*: 16: 1533-1544.
- Cooper, S.; Hinze, S.; Leys, R.; Watts, C.H.S. & Humphreys, W.F. 2002. Islands under the desert: molecular systematics and evolutionary origins of stygobitic water beetles (Coleoptera: Dytiscidae) from central Western Australia. *Invertebrate Systematics*, 16: 589-598.
- Crayn, D.M.; Rossetto, M. & Maynard, D.J. 2006. Molecular phylogeny and dating reveals an Oligo-Miocene radiation of dry-adapted shrubs (former Tremandraceae) from rainforest tree progenitors (Elaeocarpaceae) in Australia. *American Journal of Botany*, 93: 1328-1342.
- Davidson, D.S. 1952. Notes on the pictographs and petroglyphs of Western Australia and a discussion on their affinities with appearances elsewhere on the continent. *Proceedings of the American Philosophical Society*, 96: 82-84.
- Department of Mines & Petroleum. 2013. *Western Australian mineral and petroleum statistics digest 2012*. Perth: Department of Mines and Petroleum.
- Doughty, P.; Rolfe, J.K.; Burbridge, A.H.; Pearson, D.J. & Kendrick, P.G. 2011. Herpetological assemblages of the Pilbara biogeographic region, Western Australia: ecological associations, biogeographic patterns and conservation. *Records of the Western Australian Museum, Supplement*, 78: 315-340.
- Durrant, B.J.; Harvey, M.S.; Framenau, V.W.; Ott, R. & Waldo, J.M. 2010. Patterns in the composition of ground-dwelling spider communities in the Pilbara bioregion, Western Australia. *Records of the Western Australian Museum, Supplement*, 78: 185-204.
- Ellis, M. 1982. *Explanatory notes on the BELELE geological sheet*. Perth: Geological Survey of Western Australia.
- Environmental Protection Authority. 2013. *Environmental Assessment Guideline for Recommending environmental conditions*. Environmental Assessment Guideline 11, September 2013, p 10.
- Environmental Protection Authority. 2013. *Environmental Protection Authority 2012-13 Annual Report*. Perth: EPA.
- Fujioka, T., Chappell, J., Fifield, L.K., Rhodes, E.J. 2009. Australian desert dune fields initiated with Pliocene–Pleistocene global climatic shift. *Geology*, 37: 51-54.
- Fujioka, T.; Chappell, J.; Honda, M.; Yatsevich, I.; Fifield, K. & Fabel, D. 2005. Global cooling initiated stony deserts in central Australia 2-4 Ma, dated by cosmogenic ^{21}Ne - ^{10}Be . *Geology*, 33: 993-996.
- Gibson, L.A. & McKenzie, N.L. 2009. Environmental associations of small ground-dwelling mammals in the Pilbara region, Western Australia. *Records of the Western Australian Museum, Supplement*, 78: 91-122.
- Gibson, N.; Coates, D.J. & Thiele, K.R. 2007. Taxonomic research and the conservation status of flora in the Yilgarn Banded Iron Formation ranges. *Nuytsia*, 17: 1-12.

Gibson, N.; Meissner, R.; Markey, A.S. & Thompson, W.A. 2012. Patterns of plant diversity in ironstone ranges in arid south western Australia. *Journal of Arid Ecology*, 77: 25-31.

Gibson, N.; Yates, C.J. & Dillon, R. 2010. Plant communities of the ironstone ranges of south western Australia: hotspots for plant diversity and mineral deposits. *Biodiversity and Conservation*, 19: 3951-3962.

Gole, M.J. 1981. Archean banded iron-formations, Yilgarn Block, Western Australia. *Economic Geology*, 76: 1954-1974.

Government of Western Australia. 2007. *Strategic Review of the Conservation and Resource Values of the Banded Iron Formation of the Yilgarn Craton*. Perth: Department of Environment and Conservation & Department of Industry and Resources, Government of Western Australian.

Gross, G.A. 1980. A classification of iron formations based on depositional environments. *Canadian Mineralogist*, 18: 215-222.

Guthrie, N.A.; Weir, T. & Will, K. 2010. Localised and regional patterns in ground-dwelling beetle assemblages in a semi-tropical arid zone environment. *Records of the Western Australian Museum, Supplement*, 78: 169-184.

Guzik, M. T.; Austin, A.D.; Cooper, S.J.B.; Harvey, M.S.; Humphreys, W.F.; Bradford, T.; Eberhard, S.M.; King, R.A.; Leijs, R. Muirhead, K.A. & Tomlinson, M. 2010. Is the Australian subterranean fauna uniquely diverse? *Invertebrate Systematics*, 24: 407-418.

Halse, S.A.; Scanlon, M.D.; Cocking, J.S., Barron, H.J.; Richardson, J.B. & Eberhard, S.M. 2014. Pilbara stygofauna: deep groundwater of an arid landscape contains globally significant radiation of biodiversity *Records of the Western Australian Museum, Supplement*, 78: 443-483.

Halse, S.A. & Pearson G.B. 2014. Troglifauna in the vadose zone: comparison of scraping and trapping results and sampling adequacy. *Subterranean Biology*, 13: 17-34.

Harrison, S.E.; Guzik, M.T.; Harvey, M.S. & Austin, A.D. 2014. Molecular phylogenetic analysis of Western Australian troglobitic chthoniid pseudoscorpions (Pseudoscorpiones, Chthoniidae) points to multiple independent subterranean clades. *Invertebrate Systematics*, 28: 386-400.

Harvey, M.S. 1988. A new troglobitic schizomid from Cape Range, Western Australia (Chelicerata: Schizomida). *Records of the Western Australian Museum*, 14: 15-20.

Harvey, M.S. 2002. Short-range endemism amongst the Australian fauna: some examples from non-marine environments. *Invertebrate Systematics*, 16: 555-570.

Harvey, M.S.; Gray, M.R.; Hunt, G.S. & Lee, D.C. 1993. The cavernicolous Arachnida and Myriapoda of Cape Range, Western Australia. *Records of the Western Australian Museum, Supplement*, 45: 129-144.

Harvey, M.S., Berry, O., Edward, K.L. & Humphreys, G. 2008. Molecular and morphological systematics of hypogean schizomids (Schizomida : Hubbardiidae) in semiarid Australia. *Invertebrate Systematics*, 22: 167-194.

Hopper, S.D. 2009. OCBIL theory: towards an integrated understanding of the evolution, ecology and conservation of biodiversity on old, climatically buffered, infertile landscapes. *Plant Soil*, 322: 49-86.

- How, R.A. & Cowan, M.A. 2006. Collections in space and time: geographical patterning of native frogs, mammals and reptiles through a continental gradient. *Pacific Conservation Biology*, 12: 111-133.
- Hugall, A.F.; Foster, R.; Hutchinson, M. & Lee, M.S.Y. 2008. Phylogeny of Australasian agamid lizards based on nuclear and mitochondrial genes: implications for morphological evolution and biogeography. *Biological Journal of the Linnean Society*, 93: 343-358.
- Humphreys, W.F. 1990. The biology of a troglobitic schizomid (Chelicerata: Arachnida) from caves in the semi-arid Cape Range, Western Australia. *Acta Zoologica Fennica*, 190: 181-186.
- Humphreys, W.F. 1993. Stygofauna in semi-arid tropical Australia: A Tethyan connection. *Mémoires de Biospéologie*, 20: 111-116.
- Humphreys, W.F. 2008. Rising from down under: developments in subterranean biodiversity in Australia from a groundwater fauna perspective. *Invertebrate Systematics*, 22: 85-101.
- Huston, D.L.; Blewett, R.S. & Champion, D.C. 2012. Australia through time: a summary of its tectonic and metallogenic evolution. *Episodes*, 35: 23-43.
- Jacobi, C.M.; Carmo, F.F.; Vicent, R.C. & Stehmann, J.R. 2007. Plant communities on ironstone outcrops: a diverse and endangered Brazilian ecosystem. *Biodiversity and Conservation*, 16: 2185-2200.
- Lanier, H.C.; Edwards, D.L. & Knowles, L.L. 2013. Phylogenetic structure of vertebrate communities across the Australian arid zone. *Journal of Biogeography*, 40: 1059-1070.
- Lewy, Z. 2012. Banded Iron Formations (BIFs) and associated sediments do not reflect the physical and chemical properties of early Precambrian seas. *International Journal of Geosciences*, 3: 226-236.
- Leys, R. & Watts, C.H. 2008. Systematics and evolution of the Australian subterranean hydroporine diving beetles (Dytiscidae), with notes on Carabhydrus. *Invertebrate Systematics*, 22: 217-225.
- Leys, R.; Watts C.S.; Cooper, S.B. & Humphreys, W.F. 2003. Evolution of subterranean diving beetles (Coleoptera : Dytiscidae : Hydroporini, Bidessini) in the arid zone of Australia. *Evolution*, 57: 2819-2834.
- Majer, J. 2009. Saga of short-range endemics. *Australian Journal of Entomology*, 48: 265-268.
- Marin, J.; Donnellan, S.C.; Hedges, S.B.; Doughty, P.; Hutchinson, M.N.; Cruaud, C. & Vidal, N. 2013. Tracing the history and biogeography of the Australian blindsnake radiation. *Journal of Biogeography*, 40: 928-937.
- Maryan, B., Oliver, P.M., Fitch, A.J. & O'Connell, M. 2014. Molecular and morphological assessment of *Varanus pilbarensis* (Squamata: Varanidae), with a description of a new species from the southern Pilbara, Western Australia. *Zootaxa*, 3768: 139-158.
- McKenzie, N.L.; Burbidge, A.A.; Baynes, A.; Brereton, R.; Dickman, C.R.; Gibson, L.A.; Gordon, G.; Menkhorst, R.W.; Robinson, A.C.; Williams, M.R. & Woinarski, J.C.Z. 2006. Analysis of factors implicated in the recent decline of Australia's mammalian fauna. *Journal of Biogeography*, 34: 597-611.
- McKenzie, N.L.; van Leeuwen, S. & Pinder, A.M. 2009. Introduction to the Pilbara biodiversity survey, 2002–2007. *Records of the Western Australian Museum, Supplement*, 78: 3-89.

- Millar, M.A.; Coates, D.J. & Byrne, M. 2013. Genetic connectivity and diversity in inselberg populations of *Acacia woodmaniorum*, a rare endemic of the Yilgarn Craton banded iron formations. *Heredity*, 111: 437-444.
- Millar, M.A.; Coates, D.J. & Byrne, M. 2014. Extensive long-distance pollen dispersal and highly outcrossed mating in historically small and disjunct populations of *Acacia woodmaniorum* (Fabaceae), a rare banded iron formation endemic. *Annals of Botany*, 114: 437-444.
- Mole, D.R.; Fiorentini, M.L.; Cassidy, K.F.; Kirkland, C.L.; Thebaud, N.; McCuaig, T.C.; Doublier, M.P.; Duuring, P.; Romano, S.S. & Maas, R. 2013. Crustal evolution, intra-cratonic architecture and the metallogeny of an Archaean craton. London: Geological Society, Special Publications, 393.
- Moritz, C. 1994. Defining 'Evolutionarily Significant Units' for conservation. *Trends in Ecology and Evolution*, 9: 373-375.
- Morris, R.C. & Kneeshaw, M. 2011. Genesis modelling for the Hamersley BIF-hosted iron ores of Western Australia: a critical review. *Australian Journal of Earth Sciences: An International Geoscience Journal of the Geological Society of Australia*, 58: 417-451.
- Nistelberger, H.; Byrne, M.; Coates, D. & Roberts, J.D. 2014. Strong phylogeographic structure in a millipede indicates Pleistocene vicariance between populations on banded iron formations in semi-arid Australia. *PLoS ONE*, 9: e93038.
- Oliver, P.M. & Bauer, A.M. 2011. Systematics and evolution of the Australian knob-tail geckos (Nephruros, Carphodactylidae, Gekkota): plesiomorphic grades and biome shifts through the Miocene. *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 59: 664-674.
- Pepper, M.; Doughty, P.; Arculus, R. & Keogh, J.S. 2008. Landforms predict phylogenetic structure on one of the world's most ancient surfaces. *BMC Evolutionary Biology*, 8: 152.
- Pepper, M.; Doughty, P. & Keogh, J.S. 2013. Geodiversity and endemism in the iconic Australian Pilbara region: a review of landscape evolution and biotic response in an ancient refugium. *Journal of Biogeography*, 40: 1225-1239.
- Pepper, M.; Fujita, M.K.; Moritz, C. & Keogh, J.S. 2011. Palaeoclimate change drove diversification among isolated mountain refugia in the Australian arid zone. *Molecular Ecology*, 20: 1529-1545.
- Pinheiro, F.; Cozzolino, S.; Draper, D.; Barros, F.; Félix, L.P.; Fay, M.F. & Palma-Silva, C. 2014. Rock outcrop orchids reveal the genetic connectivity and diversity of inselbergs of northeastern Brazil. *BMC Evolutionary Biology*, 14: 49.
- Piper, D. 2009. Troglodytes can't stand in the way of troglobitic fauna [online]. *Australia's Paydirt*, 1(159): 96.
- Posth, N.R.; Konhauser, K.O. & Kappler, A. 2011. Banded Iron Formations. In: Reitner, J. & Thiel, V. *Encyclopedia of Geobiology*. XXVIII. Springer. p. 92-103.
- Powney, G.D.; Grenyer, R.; Orme, C.D.L.; Owens, P.F. & Meiri, S. 2010. Hot, dry and different: Australian lizard richness is unlike that of mammals, amphibians and birds. *Global Ecology and Biogeography*, 19: 386-396.

- Rabosky, D.L.; Donnellan, S.C.; Talaba, A.L. & Lovette, I.J. 2007. Exceptional among-lineage variation in diversification rates during the radiation of Australia's most diverse vertebrate clade. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 274: 2915-2923.
- Sarthou, C.; Samadi, S. & Boisselier-Dubayle, M. 2001. Genetic structure of the saxicole *Pitcairnia geyskesii* (Bromeliaceae) on inselbergs In French Guiana. *American Journal of Botany*, 88: 861-868.
- Sydney Morning Herald. 2007. Spider-like troglobite stops \$12b mine. 29th March issue.
- Tapper, S-L.; Byrne, M.; Yates, C.L.; Keppel, G.; Hopper, S.D.; Van Niel, K.; Schut, A.G.T.; Mucina, L. & Wardell-Johnson, G.W. 2014a. Isolated with persistence or dynamically connected? Genetic patterns in a common granite outcrop endemic. *Diversity and Distributions*, 20: 987-1001.
- Tapper, S-L.; Byrne, M.; Yates, C.L.; Keppel, G.; Hopper, S.D.; Van Niel, K.; Schut, A.G.T.; Mucina, L. & Wardell-Johnson, G.W. 2014b. Prolonged isolation and persistence of a common endemic on granite outcrops in both mesic and semi-arid environments in southern-western Australia. *Journal of Biogeography*. DOI: 10.1111/jbi 12343.
- Trendall, A.F. 2002. The significance of iron-formation in the Precambrian stratigraphic record. *International Association of Sedimentologists, Special Publication*, 33: 33-66.
- Van Etten, E. 2009. Inter-annual rainfall variability in arid Australia: greater than elsewhere? *Australian Geographer*, 40: 109-120.
- van Leeuwen, S. & Bromilow, B. 2002. *Botanical survey of the Hamersley Range uplands*. Final Report, National Reserve System Project N709. Perth: Western Australian Department of Conservation and Land Management.
- Wege, J.A.; Shepherd, K.A. & Butcher, R. 2007. Preface: Special edition funded by the Western Australian Government's 'Saving our Species' biodiversity conservation initiative. *Nuytsia*, 17: i.
- Wege, J.A.; Thiele, K.R.; Shepherd, K.A.; Butcher, R.; Macfarlane, T.D. & Coates, D.J. 2014. Strategic taxonomy in a biodiverse landscape: a novel approach to maximizing conservation outcomes for rare poorly known flora. *Biodiversity and Conservation*. DOI: 10.1007/s10531-014-0785-4.
- Woinarksi, J.; Fensham, R.; Whitehead, P. & Fisher, A. 2000. *Digest of biodiversity changes and threatening processes across each rangeland bioregion*. Appendix A to background paper 1: A review of changes in status and threatening processes. Darwin: Tropical Savannahs Cooperative Research Centre.
- Yates, C.J.; Gibson, N.; Pettit, N.E.; Dillon, R. & Palmer, R. 2011. The ecological relationships and demography of restricted ironstone endemic plant species: implications for conservation. *Australian Journal of Botany*, 59: 692-700.
- Yates, C.J.; Ladd, P.G.; Coates, D.J. & McArthur, S. 2007. Hierarchies of cause: understanding rarity in an endemic shrub *Verticordia staminosa* (Myrtaceae) with a highly restricted distribution. *Australian Journal of Botany*, 55: 194-205.

Appendix 1 - BIF specialist plants in the Pilbara. Endemic species are entirely restricted to BIF substrates, species centred on BIF distributions extend to other substrates. Nomenclature follows current usage at Western Australian Herbarium.

Family	Taxon	Distribution
Araliaceae	<i>Astrotricha hamptonii</i>	centered on BIF
Asteraceae	<i>Apowollastonia hamersleyensis</i>	centered on BIF
	<i>Pilbara trudgenii</i>	endemic
	<i>Pleurocarpaea gracilis</i>	endemic
	<i>Senecio hamersleyensis</i>	centered on BIF
Brassicaceae	<i>Lepidium catapycnon</i>	centered on BIF
Celastraceae	<i>Maytenus</i> sp. Mt Windell (S. van Leeuwen 846)	centered on BIF
Dilleniaceae	<i>Hibbertia glaberrima</i>	centered on BIF
Elaeocarpaceae	<i>Tetratheca fordiana</i>	endemic
Fabaceae	<i>Acacia bromilowiana</i>	centered on BIF
	<i>Acacia daweana</i>	centered on BIF
	<i>Acacia effusa</i>	centered on BIF
	<i>Acacia exilis</i>	centered on BIF
	<i>Acacia hamersleyensis</i>	centered on BIF
	<i>Acacia marramamba</i>	centered on BIF
	<i>Acacia thoma</i>	centered on BIF
	<i>Gompholobium karijini</i>	endemic
	<i>Gompholobium oreophilum</i>	centered on BIF
	<i>Indigofera ixocarpa</i>	centered on BIF
	<i>Indigofera</i> sp. Bungaroo Creek (S. van Leeuwen 4301)	centered on BIF
	<i>Indigofera</i> sp. Fractiflexa (S. van Leeuwen 3773)	centered on BIF
	<i>Senna ferraria</i>	centered on BIF
	<i>Tephrosia oxalidea</i>	centered on BIF
Goodeniaceae	<i>Dampiera anonyma</i>	centered on BIF
	<i>Dampiera metallorum</i>	endemic
	<i>Scaevola</i> sp. Mt Bruce (M.E. Trudgen 1333)	endemic
	<i>Scaevola</i> sp. Mt Nameless (PAS Wurm 1443)	endemic
Hemerocallidaceae	<i>Tricoryne</i> sp. Hamersley Range (S. van Leeuwen 915)	centered on BIF
Lamiaceae	<i>Newcastelia</i> sp. Hamersley Range (S. van Leeuwen 4264)	centered on BIF
Malvaceae	<i>Brachychiton acuminatus</i>	centered on BIF
	<i>Corchorus incanus</i> subsp. <i>lithophilus</i>	centered on BIF
	<i>Corchorus</i> sp. Hamersley Range (S. van Leeuwen 3586)	endemic

Family	Taxon	Distribution
	<i>Corchorus</i> sp. Hamersley Range hilltops (S. van Leeuwen 3826)	centered on BIF
	<i>Hibiscus haynaldii</i>	centered on BIF
	<i>Hibiscus</i> sp. Mt Robinson (G. Byrne 3537)	endemic
	<i>Hibiscus</i> sp. Canga (PJH Hurter & J Naaykens 11013)	endemic
	<i>Hibiscus</i> sp. Gurinbiddy (MET 15708)	endemic
	<i>Hibiscus</i> sp. Mt Brockman (E Thoma ET 1354)	endemic
	<i>Sida</i> sp. Barlee Range (S. van Leeuwen 1642)	centered on BIF
	<i>Sida</i> sp. Hamersley Range (K. Newbey 10692)	centered on BIF
	<i>Sida</i> sp. Shovelanna Hill (S. van Leeuwen 3842)	centered on BIF
	<i>Triumfetta leptacantha</i>	centered on BIF
Myrtaceae	<i>Aluta quadrata</i>	centered on BIF
	<i>Eucalyptus aridimontana</i>	endemic
	<i>Eucalyptus lucens</i>	endemic
	<i>Eucalyptus pilbarensis</i>	centered on BIF
	<i>Eucalyptus repullulans</i>	centered on BIF
Oxalidaceae	<i>Oxalis</i> sp. Pilbara (M.E. Trudgen 12725)	centered on BIF
Phyllanthaceae	<i>Sauropus</i> sp. Koodaideri detrials (J Naaykens & J Hurter JH 11213)	endemic
Poaceae	<i>Eragrostis</i> sp. Mt Robinson (S. van Leeuwen 4109)	endemic
	<i>Themeda</i> sp. Mt Barricade (M.E. Trudgen 2471)	centered on BIF
	<i>Triodia</i> sp Mt Ella (M.E. Trudgen 12739)	centered on BIF
	<i>Triodia</i> sp. Karijini (S. van Leeuwen 4111)	centered on BIF
	<i>Triodia</i> sp. Robe River (M.E. Trudgen 12367)	centered on BIF
	<i>Triodia</i> sp. Shovelanna Hill (S. van Leeuwen 3835)	centered on BIF
Proteaceae	<i>Grevillea saxicola</i>	centered on BIF
Rhamnaceae	<i>Cryptandra monticola</i>	centered on BIF
Rubiaceae	<i>Pomax rupestris</i>	centered on BIF
Scrophulariaceae	<i>Eremophila appressa</i>	centered on BIF
	<i>Eremophila jucunda</i> subsp. <i>pulcherrima</i>	centered on BIF
	<i>Eremophila magnifica</i> subsp. <i>magnifica</i>	endemic
	<i>Eremophila magnifica</i> subsp. <i>velutina</i>	endemic
	<i>Eremophila petrophila</i> subsp. <i>petrophila</i>	centered on BIF
	<i>Eremophila phyllopoda</i> subsp. <i>obliqua</i>	centered on BIF
	<i>Eremophila</i> sp. Snowy Mountain (S. van Leeuwen 3737)	endemic
	<i>Eremophila</i> sp. West Angelas (S. van Leeuwen 4068)	endemic

QUENTES, SECAS E ANTIGAS: FORMAÇÕES FERRÍFERAS BANDADAS DA AUSTRÁLIA OCIDENTAL

Neil Gibson, David Coates, Stephen van Leeuwen & Colin Yates

Introdução

As formações ferríferas bandadas (FFB) da Austrália Ocidental limitam-se aos dois crátons mais antigos da região: Yilgarn, no sul, e Pilbara, no noroeste, os quais formaram o núcleo do continente australiano que se desenvolvia (Figura 1; Huston *et al.* 2012). Ainda não foi atingido um consenso sobre as origens das FFBs (Posth *et al.* 2011, Lewy 2012), mas dois grandes grupos têm sido reconhecidos: FFB Algoma, formações que geralmente apresentam pequena extensão lateral e são frequentemente associadas a rochas vulcânicas; e FFB Superior, as quais, ao contrário, apresentam grande extensão e pouca influência vulcânica (Gross 1980; Posth *et al.* 2011). O tipo Algoma descreve melhor as FFBs de Yilgarn, que são relativamente pequenas e imersas em cinturões de rochas verdes arqueanas (do inglês *greenstone belts*) de origem vulcânica que sofreram deformação significativa (Figura 2a&b). Já o tipo Superior descreve melhor as FFBs de Pilbara, que ocorrem no Maciço de Hamersley. Estes depósitos são imensos, cobrindo uma área de mais de 60.000 km², com camadas de mais de 100 m, e têm padrões de bandamento em macro e microescala que podem ser seguidos por 80-300 km (Figura 3). Acredita-se que foram formados em grandes bacias sedimentares (Trendall 2002). Menores ocorrências do tipo Algoma são encontradas em outros locais do Pilbara (Figura 3).

Apesar das FFBs do Maciço de Hamersley terem-se formado mais tarde (2.590 – 2.450 Ma) do que as de Yilgarn (3.000 – 2.800 Ma) (Trendall 2002; Mole *et al.* 2013), a geoquímica de ambas é muito parecida, assim como os padrões de meso- e microbandamento, sugerindo uma origem geoquímica semelhante. Embora alguns autores rejeitem a classificação das FFBs da Austrália Ocidental nos tipos Algoma vs. Superior e sugiram que as diferenças em espessura e extensão tenham surgido principalmente a partir de um retrabalhamento metamórfico que ocorreu durante a gênese do cráton Yilgarn (Gole 1981; Trendall 2002), esta classificação forma uma subdivisão útil de tipos de FFBs na Austrália Ocidental. No Pilbara estão incluídos os depósitos fluviais de ferro do Terciário formados em sinuosos paleocanais de drenagem e os depósitos detríticos de ferro formados sobre encostas, que resultaram da deposição pliocênica advinda da erosão de FFBs arqueanas e proterozoicas vizinhas. Estas ocorrem através da Bacia de Hamersley e se formaram há cerca de 28–5 Ma (Huston *et al.* 2012).

Trabalhos recentes no Brasil e na Austrália mostraram que algumas áreas das FFBs são importantes centros de diversidade (Jacobi *et al.* 2007; Gibson *et al.* 2010; Gibson *et al.* 2012; Pepper *et al.* 2013), o que pode levar a difíceis decisões sobre o uso da terra, já que as FFBs também são uma importante fonte de minério de ferro. Neste capítulo, nós vamos rever o que se sabe sobre a biota destes antigos sistemas ferríferos e, então, fornecer algumas estatísticas atuais sobre a mineração de ferro na Austrália Ocidental, descrever brevemente os processos governamentais seguidos no desenvolvimento da proposta de mineração, e discutir as estratégias que estão sendo desenvolvidas para tentar minimizar os impactos da mineração sobre os objetos de valores para a conservação.

Figura 1 - Localização dos crátons Yilgarn e Pilbara na Austrália Ocidental. Áreas de FFBs são mostradas em amarelo. No Pilbara, a distribuição é baseada em mapeamento 1:250.000; no Yilgarn, apenas os maciços ferríferos amostrados são identificados, devido à falta de um mapeamento uniforme. As localizações dos dois centros de diversidade das espécies especialistas das FFBs no Yilgarn são representadas por círculos azuis. As fronteiras dos crátons são representadas em vermelho; isoietas em intervalos de 300 mm estão em preto. O modelo digital de terreno mostra as planícies em verde a as áreas de maior altitude variando de marrom a roxo.

Flora

A flora das FFBs do Yilgarn e Pilbara tem sido pouco documentada até recentemente e o status de conservação de muitos táxons permanece desconhecido. No entanto, o aumento da exploração do minério de ferro na Austrália Ocidental resultou em dramático aumento do levantamento botânico nas faixas das FFBs e entorno em ambas regiões. Concomitantemente, tem havido um aumento no esforço taxonômico para delimitar e descrever novas espécies e avaliar seus status de conservação (Gibson *et al.* 2007; Wege *et al.* 2014). Por exemplo, um estudo taxonômico feito em 2006 e 2007, nas faixas das FFBs de Yilgarn e outras áreas de alto potencial para a mineração, resultou em 95 novos táxons descritos, que pertencem a 21 famílias e 33 gêneros, dos quais 78 táxons foram considerados de interesse para a conservação (Wege *et al.* 2007). Apesar deste esforço, há muitos outros táxons nas FFBs do Yilgarn e Pilbara de provável importância para a conservação que ainda não foram descritos.

Comparação dos padrões do Yilgarn e Pilbara

Composição e formas de vida

A vegetação e flora foram estudadas em detalhe em 24 maciços no Yilgarn e um levantamento recente dos padrões encontrados nestas regiões foi publicado (Gibson *et al.* 2012) (Figura 1). A FFB nestas faixas tende a ocorrer na forma de afloramento linear altamente metamorfizado dentro

de cinturões mais largos de rochas verdes. O afloramento de FFB geralmente se estende por 30–50 km de comprimento e por até 5 km de largura, e raramente se eleva mais do que 200 m em relação à planície circundante. Uma flora de 906 táxons foi registrada nesses maciços, os quais são caracterizados por alta diversidade beta e concentração de endemismos em determinadas regiões das FFBs. A área entre os cinturões de rocha verde é dominada por floresta ou arbustal desenvolvidos sobre depósitos coluviais e aluviais, ou sobre planícies arenosas que se desenvolveram *in situ* a partir da laterização durante o Terciário. Ocasionalmente rochas graníticas do embasamento cristalino afloram como inselbergs na forma de domo. O clima é caracterizado como mediterrâneo semiárido no sudoeste, modificando-se gradualmente para tropical semiárido no nordeste. A precipitação é geralmente associada a frentes imersas nas correntes de ar vindas do oeste durante o inverno. A influência destas correntes de ar diminui ao norte, onde a precipitação proveniente de tempestades tropicais que perderam a força se torna mais importante.

No presente trabalho, nós comparamos os padrões de flora e vegetação encontrados nas FFB do Yilgarn com aqueles encontrados em um inventário compreendendo 72 topos de montanhas dos maciços de Hamersley no Pilbara (van Leeuwen & Bromilow 2002). Registros de herbário indicam que no Maciço de Hamersley há uma flora de 1.385 táxons, dos quais 818 ocorrem em áreas mapeadas como FFB. O Maciço de Hamersley é uma vasta extensão anastomosada da FFB, estendendo-se na direção leste-oeste por 400 km e na direção norte-sul por 120 km, e ocupando grande parte da porção sul do cráton Pilbara (Figura 3). Sua topografia é bem mais diversa que a das faixas de Yilgarn, com um escarpamento íngreme ao longo da fronteira norte, separada pelo Vale de Fortescue das rochas vulcânicas do Maciço de Chichester (Figura 4a). A porção norte do cráton Pilbara é coberta por rochas graníticas do embasamento cristalino e é circundada ao norte e leste por desertos arenosos, ao oeste pelo mar e ao sul por rochas altamente metamorfozadas. A região possui clima tropical semiárido com chuvas de verão episódicas e erráticas, originadas em grande parte por tempestades tropicais e sistemas ciclônicos (van Etten 2009).

Figura 2 - FFBs do cráton Yilgarn. a) Detalhe do afloramento da FFB, mostrando a natureza altamente deformada das FFB do Yilgarn em uma escala muito fina, centimétrica. b) A FFB do Jasper Hill é dominada por arbustais na área montanhosa e florestas de eucaliptos nas áreas de inclinações menores e planas. A orientação vertical do bandamento indica deformação na escala da paisagem. c) *Spartothamnella* sp., proveniente do Maciço Helena & Aurora (P.G. Armstrong 155-109) (Família: Lamiaceae), é uma espécie especialista da FFB que atualmente está sob revisão taxonômica. Imagens a: A. Markey; b: S. Dillon; c: K. Thiele.

Figura 3 - São mostradas as FFBs no Pilbara (em amarelo), a localização das parcelas amostradas (pontos verdes) e as maiores unidades de conservação (delineadas). O Maciço de Hamersley é o extenso sistema de montanhas ao sul do Vale de Fortescue, que tem o Maciço de Chichester ao norte. As fronteiras simplificadas do cráton são mostradas em vermelho. O modelo digital de terreno mostra as planícies em verde e as áreas de maior altitude variando de marrom a roxo.

Em um inventário no Pilbara foram estabelecidas parcelas de 50 x 50 m em cada uma das 72 áreas elevadas perto do topo e amostradas em duas ocasiões (Figura 3). Em cada parcela foram registradas todas as plantas vasculares encontradas, em conjunto com uma descrição padrão do site e mapeamento do local com GPS. O estudo do Yilgarn foi baseado em 50 parcelas de 20 x 20 m amostradas uma única vez em cada um dos 24 maciços. Os métodos de análise de dados são detalhados em Gibson *et al.* (2012) e espécies anuais foram excluídas de algumas análises.

Formas de vida e famílias dominantes

As formas de vida encontradas nas FFBs do Pilbara mostram um aumento da dominância de plantas perenes em comparação ao Yilgarn (Figura 5). Embora os arbustos sejam a forma de vida mais comum em ambas as regiões, o Pilbara apresenta menores proporções de herbáceas anuais, geófitas e gramíneas anuais e uma importância relativa maior de herbáceas perenes, árvores, trepadeiras e parasitas perenes e touceiras de gramíneas (*hummock grasses*). Esta diferença na composição das formas de vida é provavelmente causada por diferenças no clima entre as duas regiões (predominância de chuvas de inverno no Yilgarn, e chuvas de verão no Pilbara), já que padrões de dominância semelhantes são observados em outros substratos no Pilbara. Em relação à estrutura da vegetação, a diferença mais óbvia é a dominância de touceiras da gramínea perene *Triodia* através do Pilbara, as quais, com poucas exceções, são incomuns nas FFBs do Yilgarn.

A composição geral da flora em termos das famílias mais bem representadas também mostra algumas diferenças (Figura 6). Asteraceae e Fabaceae são as famílias mais ricas em espécies em ambas as áreas, que também apresentam proporções semelhantes de Myrtaceae e Poaceae. No entanto, a família Malvaceae é muito mais rica e a família Chenopodiaceae muito menos rica no Pilbara do que no Yilgarn. Proporções crescentes das famílias Goodeniaceae, Amaranthaceae e Solanaceae também são evidentes no Pilbara.

Figura 4 - FFBs do cráton Pilbara. a) escarpamento ao norte do Maciço de Hamersley visto ao sul do Vale de Fortescue; note a sequência de camadas horizontais na FFB. b) *Callitris glaucophylla* (Família: Cupressiaceae) em topos protegidos do fogo dos maiores penhascos e sistemas de desfiladeiros do Maciço de Hamersley. c) *Astrotricha hamptonii* (Família: Araliaceae) é uma espécie especialista da FFB em um afloramento de FFB no Parque Nacional Karijini. Imagens: S. van Leeuwen.

Figura 5 - Formas de vida da flora nas FFBs com frequência > 1% nos crátons Yilgarn e Pilbara. Os táxons perenes em cada parcela representam a média por faixa no Yilgarn e o máximo e mínimo por parcela no Pilbara; n é o número de táxons registrados.

Figura 6 - A percentagem das dez famílias mais comuns da flora nas FFBs do Yilgarn e do Pilbara; n é o número de famílias registradas.

Riqueza e taxa substituição de espécies

No Yilgarn, 62% dos táxons foram encontrados em menos de 10% das parcelas (120 parcelas), e uma proporção semelhante foi encontrada no Pilbara, com 58% dos táxons registrados em menos de 10% das parcelas (7 parcelas). Isto indica uma rápida taxa de substituição na composição de espécies através das FFBs tanto do Yilgarn como do Pilbara. Uma diferente medida de diversidade beta foi desenvolvida por Baselga (2010, 2012), estendendo a medida de dissimilaridade de Sørensen para cobrir múltiplos locais (β_{SOR}), que pode ser decomposta em componentes relacionados à taxa de substituição de espécies (β_{SIM}) e aninhamento (β_{SNE}). Tanto o Yilgarn como o Pilbara mostram padrões semelhantes de alta taxa de substituição de espécies, sendo a taxa registrada para o Yilgarn levemente maior do que aquela registrada para o Pilbara (Tabela 1). A alta taxa de substituição de espécies tanto no Yilgarn como no Pilbara é da mesma ordem que aquela registrada nas florestas de *Banksia*, rica em espécies, localizada no altamente diverso sudoeste da Austrália Ocidental (Gibson, dados não publicados).

No Yilgarn, atributos espaciais, química do solo e clima explicaram individualmente entre 25 e 49% da variação em riqueza de espécies perenes e, com a inclusão das variáveis do local, explicaram um total de 60% da variabilidade em riqueza de espécies (Figura 3a em Gibson *et al.* 2012). No Pilbara, a química do solo, o clima e atributos espaciais não conseguiram explicar a variação na riqueza de espécies perenes.

Similarmente, modelos de composição de espécies perenes no Pilbara tiveram pouco poder explicativo. Vetores significativos foram determinados por seleção progressiva de dados do clima (isotermalidade, sazonalidade da temperatura), da química do solo (Ca, Mg) e espaciais (9 vetores); porém, estes explicaram apenas 8% da variância total. A altitude não apresentou nenhum poder explicativo em termos de composição de espécies. Em contrapartida, os modelos do Yilgarn para composição de espécies contabilizaram 34% da variância total (Gibson *et al.* 2012).

Tabela 1 - A partição da medida de dissimilaridade de Sørensen para múltiplos locais em componentes relacionados à taxa de substituição de espécies (β_{SIM}) e aninhamento (β_{SNE}) foi baseada em Baselga (2010, 2012). Para os conjuntos de dados das faixas do Pilbara (72 parcelas), das faixas combinadas do Yilgarn (1217 parcelas) e das florestas *Banksia* no sudoeste da Austrália (134 parcelas), foi usado um procedimento de reamostragem para padronizar o tamanho da amostra em 50 parcelas.

	β_{SOR}	β_{SIM}	β_{SNE}
Faixas individuais do Yilgarn	0.943–0.956	0.926 – 0.943	0.007 – 0.019
Faixas combinadas do Yilgarn	0.961	0.948	0.014
Pilbara	0.944	0.928	0.017
Florestas <i>Banksia</i>	0.952	0.939	0.012

Figura 7 - FFBs do Pilbara. a) planalto de topo plano encontrado no Parque Nacional Karijini no centro do Pilbara. b) vista para o Monte Bruce, o segundo maior pico do Maciço de Hamersley. c) *Hibbertia glaberrima* (Família: Dilleniaceae), uma especialista da FFB do Pilbara. Barra de escala: 10 mm. d) *Scaevola* sp. proveniente do Monte Nameless (P.A.S. Wurm 1443) (Family: Goodeniaceae), uma espécie endêmica da FFB, restrita a um único topo de montanha. Barra de escala: 10 mm. Imagens a,b,c: S. van Leeuwen; d: K. Thiele.

Táxons concentrados nas FFB

Sabe-se que 44 espécies são endêmicas ou têm o seu centro de distribuição localizado nos maciços da FFB do Yilgarn (aqui denominadas especialistas da FFB) (Figura 2c). Quando a distribuição espacial destas espécies foi plotada em quadrículas (15' x 15'), duas concentrações destes especialistas da FFB foram encontradas ao longo da fronteira da Zona Árida (mais ou menos equivalente à isoietas de 300 mm de pluviosidade do sudoeste (Byrne *et al.* 2008), que separa as florestas e arbustais ricos em espécies do sudoeste da esparsa vegetação do interior (Figura 1) (Gibson *et al.* 2012).

Uma lista de espécies do Pilbara, cujo centro de distribuição é restrito à FFB, ou tem seu centro de distribuição localizado na FFB, foi compilada a partir de diversas fontes e checada em relação à informação de distribuição atualmente em poder do Herbário da Austrália Ocidental. Um total de 66 especialistas da FFB foi identificado, 20 dos quais parecem ser endêmicos da FFB (Figuras 4c e 7c&d, Apêndice 1). O padrão de coocorrência (número de espécies por quadrícula) destes especialistas da FFB do Pilbara foi examinado usando os registros e dados de inventário do Herbário da Austrália Ocidental. Como no Yilgarn, especialistas da FFB estão concentrados em áreas específicas, neste caso em áreas do centro e leste do Maciço de Hamersley (Figura 8).

Figura 8 - Número de especialistas da FFB do Pilbara (táxons endêmicos ou que têm o seu centro de distribuição localizado na FFB) por quadrícula. As células com a mais alta concentração de especialistas da FFB se sobrepõem ao local do Parque Nacional Karijini. As maiores unidades de conservação estão delineadas como na Figura 3; fronteira simplificada do cráton Pilbara em vermelho; mapa 1:250.000 da FFB mostrado em cinza.

A separação da variância da riqueza das especialistas da FFB encontradas no conjunto de dados do Pilbara (38 dos 60 táxons ocorreram em 72 parcelas) mostrou que a altitude foi o fator mais importante (explicou 41% da variância total, sendo 12 % da variância exclusivamente explicada pela altitude). A química do solo (Mg e Ca) explicou mais 6% da variância, e o clima (temperatura máxima do mês mais quente) não explicou a variância sozinho (Figura 9). No total, o modelo explicou 43% da variância da riqueza dos especialistas da FFB. Isto é consistente com o mapeamento de espécies, que mostrou a concentração de especialistas da FFB ocorrendo no ponto mais alto do Maciço de Hamersley (Figura 8). No Yilgarn, a localização espacial, o solo, o clima e o local explicaram 34% da variância da riqueza dos especialistas da FFB, sem a dominância de nenhum fator (Figura 4 em Gibson *et al.* 2012).

Figura 9 - Separação da variação da riqueza de espécies perenes de especialistas da FFB do Pilbara usando os conjuntos de dados de altitude, solo e clima. O retângulo indica o total da variação na riqueza de espécies de especialistas da FFB, os círculos no interior do retângulo representam a proporção da variação atribuída aos diferentes conjuntos de dados. As contribuições exclusivas e conjuntas de cada conjunto de dados são mostradas na figura. O total da variação explicada independentemente por cada conjunto de dados é mostrado entre parênteses.

Fauna

Invertebrados

Uma das mais importantes descobertas em biodiversidade da Austrália Ocidental nos últimos anos foi a diversa fauna subterrânea de troglóbios (organismos que residem em cavidades cheias de ar conhecidas em inglês como “*vugs*”) e estigobiontes (organismos que residem em cavidades cheias de água), entre os quais estão incluídos principalmente hexápodes, aracnídeos, miriápodes e crustáceos (Humphreys 1990, 1993; Harvey *et al.* 1993; Humphries 2008; Harrison *et al.* 2014) (Figura 10). Estudos filogenéticos sobre a fauna de estigobiontes (Leys *et al.* 2003; Cooper *et al.* 2002; Cooper *et al.* 2007) mostraram que ela é caracterizada por muitas espécies endêmicas com áreas de distribuição geográfica restritas (Harvey 2002) a aquíferos formados em seqüências sedimentares não consolidadas, calcretes, rochas carbonáticas e fraturadas (Halse *et al.* 2014). Embora os rebaixamentos dos lençóis de água subterrâneos e as mudanças na qualidade da água associadas à mineração e diversificação da pecuária possam ter impactos significativos sobre a fauna de estigobiontes (Halse *et al.* 2014), a discussão aqui se concentra na biologia da fauna de troglóbios das FFBs do Pilbara.

Acredita-se que os troglóbios tenham evoluído da fauna da serapilheira de uma floresta tropical do Terciário após a aridificação da metade do Terciário (Humphries 2008; Byrne *et al.* 2008). Os troglóbios ocorrem principalmente na zona vadosa de aquíferos em calcretes e em cavidades de rochas fraturadas no Pilbara e Yilgarn (Harvey *et al.* 2008; Harrison *et al.* 2014). A taxonomia e distribuição da fauna de troglóbios no Pilbara ainda é pouco conhecida, com 549 táxons registrados em inventários cobrindo menos de 1% da região (Halse e Pearson 2014). O estado do conhecimento dos troglóbios no Yilgarn é ainda menos desenvolvido. A estimativa recente da fauna de troglóbios alcançando 960 táxons na metade ocidental da Austrália é possivelmente conservadora (Guzik *et al.* 2010).

As primeiras coleções da Austrália Ocidental vieram de sistemas de cavernas de calcário (Harvey 1988), mas na metade de 2007 uma fauna de troglóbios das FFBs veio a público com a descoberta de troglóbios no vale do Rio Robe, no Pilbara. Descobriu-se que diversos planaltos de depósitos fluviais de ferro, alguns dos quais tinham sido minerados e outros com prospecção para a mineração, abrigavam uma diversa fauna troglóbia em numerosas cavidades (*vugs*) e fissuras internas (Harvey *et al.* 2008). Erosões do início ao meio do Mioceno de FFBs do Arqueano/Proterozoico produziram depósitos fluviais de ferro, que mais tarde formaram estes planaltos também por erosão. Análises moleculares de esquizomídeos (pseudoescorpíões) revelaram uma série de táxons endêmicos com áreas de distribuição geográfica pequenas; cada táxon específico

de um único planalto (Harvey *et al.* 2008). Inicialmente, uma proposta de mineração de doze bilhões de dólares australianos foi considerada ambientalmente inaceitável, com base nos impactos previstos sobre a fauna troglóbia. Mais tarde, porém, o empreendimento redesenhou o plano de mineração de acordo com a definição dos *habitats* de esquizomídeos (SMH 2007; Majer 2009; Piper 2009).

Muito menos trabalhos têm sido feitos com troglóbios em comparação à fauna de estigobiontes ao longo das últimas duas décadas, o que resulta em grande parte da metodologia de amostragem ser mais difícil (i.e., iscagem em poços artesianos por algumas semanas ou raspagem (Halse & Pearson 2014)). No entanto, um estudo molecular recente sobre esquizomídeos no Yilgarn e Pilbara mostrou uma forte estruturação geográfica nos táxons subterrâneos, consistente com o endemismo de área de distribuição geográfica pequena, como observado na fauna de estigobiontes (Harrison *et al.* 2014).

Um inventário regional recente com outros grupos de invertebrados no Pilbara mostrou padrões de composição consistentes com as mais importantes superfícies geológicas para aranhas (Durrant *et al.* 2010) e besouros que vivem no solo (Guthrie *et al.* 2010), com faunas distintas ocorrendo nas FFBs. Uma grande parte destas faunas ainda precisa ser descrita, e não há ainda estudos genéticos detalhados disponíveis para se desvendar os padrões filogenéticos.

Vertebrados

Enquanto não foi feito nenhum estudo regional recente sobre vertebrados que ocorrem nas FFB do Yilgarn, um trabalho considerável tem sido feito no Pilbara (McKenzie *et al.* 2009). O Pilbara é conhecido como uma área de alta biodiversidade e endemismo de répteis (How & Cowan 2006; Powney *et al.* 2010; Doughty *et al.* 2011), com muitas espécies endêmicas rupestres. Padrões de composição de espécies tanto para mamíferos como para répteis estão fortemente ligados à geologia da superfície, mas os padrões de composição de espécies não mostraram nenhuma assembleia exclusiva da FFB (Gibson & McKenzie 2009; Doughty *et al.* 2011). Isto contradiz os padrões em uma escala mais fina mostrados por várias espécies de répteis e complexos de espécies na região (Pepper *et al.* 2013; Maryan *et al.* 2014).

O Pilbara tem maior riqueza de espécies de lagartos da infraordem Gekkota do que qualquer outra área na Austrália (Powney *et al.* 2010) e a taxonomia deste grupo ainda precisa ser resolvida. Em um estudo filogenético sobre o lagarto *Lucasium stenodactylum*, Pepper *et al.* (2008) encontrou cinco clados principais, cuja distribuição batia perfeitamente com a geologia da superfície. Em um estudo expandido, que incluiu mais seis espécies codistribuídas, uma forte diferenciação genética na direção norte-sul através dos limites do cráton foi confirmada como uma importante subdivisão. Além disso, foi encontrada outra subdivisão dentro do Pilbara entre a Bacia de Hamersley (principalmente as FFBs do Maciço de Hamersley) e rochas vulcânicas e granitos do norte, refletindo os padrões de composição de espécies reportado para aranhas e besouros habitantes do solo (Durrant *et al.* 2010; Guthrie *et al.* 2010).

Estudos genéticos e morfológicos também identificaram uma linhagem do sul do grande lagarto varanídeo do Pilbara, a qual atualmente é considerada endêmica das FFBs (Maryan *et al.* 2014). Pepper *et al.* (2013) fizeram uma análise similar dos Gekkota para o complexo de ampla distribuição *Heteronotia spelea*, que ocorre nos maciços do Pilbara e da Austrália Central. Isto resultou em três táxons: um confinado às faixas centrais, um endêmico localizado no norte do Pilbara, e um terceiro táxon mais amplamente distribuído no Pilbara. Este terceiro táxon, no entanto, tem uma estrutura filogenética que reflete uma linhagem (de FFB) do sudeste e outras linhagens do sudoeste e nordeste.

Enquanto a fauna de répteis do Pilbara mostra clássicos exemplos de vicariância e diversificação ecológica através de uma paisagem antiga e heterogênea (Pepper *et al.* 2008, 2013), este pode não ser o caso de todos os grupos de vertebrados (Lanier *et al.* 2013).

Conectividade e dispersão

Formações Ferríferas Bandadas são topografias que, em muitos casos, se comportam como ilhas terrestres. Embora sejam *habitats* topograficamente menos conspícuos do que algumas ilhas terrestres, as FFB tipicamente variam consideravelmente em tamanho e grau de disjunção espacial. Isto as torna modelos ideais para investigar a importância da conectividade ou isolamento e processos evolutivos, como fluxo gênico, na formação da estrutura genética da população, divergência filogenética e especiação.

Muitos estudos até o momento têm-se concentrado em um pequeno número de espécies endêmicas da FFB, que estão sendo ou podem ser impactadas por operações de mineração. Os poucos estudos disponíveis têm enfatizado os variados níveis de conectividade e fluxo gênico, e a persistência da flora e fauna relacionada a *habitats* específicos. Um estudo genético de quatro táxons sem folhas de *Tetratheca* (Família: Elaeocarpaceae), que são amplamente restritos a imensos afloramentos das FFBs sobre quatro faixas adjacentes, encontrou profundas divisões filogenéticas entre os táxons. Parece que esta forma de vida evoluiu independentemente em pelo menos três ocasiões distintas, e que esta restrição a pequenos afloramentos de FFB disjuntos na mesma área geográfica é o resultado de especiação *in situ* após um longo período de isolamento (Butcher *et al.* 2007). Um estudo demográfico paralelo mostrou três táxons restritos a um tipo de *habitat* bastante específico, principalmente profundas fissuras na rocha capazes de manter umidade suficiente para garantir a sobrevivência através do longo verão seco, no qual a temperatura na superfície da rocha provavelmente excede 50°C. O estabelecimento bem sucedido destes táxons parece depender da ocorrência de chuvas tanto no inverno quanto no verão, uma sequência de eventos incomum neste ambiente. Consequentemente, a viabilidade das populações presentes é bastante dependente da manutenção de plantas adultas reprodutivas (Yates *et al.* 2011).

Outros estudos genéticos mais detalhados sobre espécies de plantas endêmicas da FFB mostraram uma estrutura genética significativa ao longo de pequenas distâncias, historicamente com fluxo gênico baixo no caso de *Tetratheca paynteri* subsp. *paynteri* (Butcher *et al.* 2009) e fluxo

gênico maior em *Acacia woodmaniorum* (Família: Fabaceae) (Millar *et al.* 2013; 2014). Em ambos os casos, pequenas populações isoladas mostraram um valor de conservação significativo, enquanto diferentes polinizadores e síndromes de polinização são provavelmente fatores-chave para entender os padrões de conectividade e fluxo gênico entre populações.

Em *Tetradlea paynteri* subsp. *paynteri*, uma espécie endêmica da FFB com uma distribuição total de cerca de 4 ha, descobriu-se que intervalos entre 80–120 m constituem efetivas barreiras para o fluxo gênico. A dispersão de pólen extremamente restrita (3 m no máximo) e o domínio do cruzamento com o vizinho mais próximo mantiveram a forte estruturação genética das populações através destas distâncias (Butcher *et al.* 2009). Abelhas nativas de quatro espécies de *Lasioglossum* foram observadas polinizando *T. paynterae* por vibração (*buzz-pollination*), e três destas espécies carregaram somente pólen de *Tetradlea* (Butcher *et al.* 2009). Parece que estes polinizadores limitam os seus movimentos a grupos de plantas locais e que eles são amplamente específicos a *Tetradlea paynteri* subsp. *paynteri* nesses rochedos de ferro. Historicamente, baixo fluxo gênico e longa persistência já foram reportados em plantas restritas a inselbergs na Austrália (Yates *et al.* 2007; Byrne & Hopper 2008; Tapper *et al.* 2014a, Tapper *et al.* 2014b) e outros locais (Sarhou *et al.* 2001; Pinheiro *et al.* 2014), indicando a natureza antiga e altamente isolada destes sistemas.

Por outro lado, uma análise com *Acacia woodmaniorum* mostrou que a conectividade genética foi mantida por fluxo gênico mediado por pólen ao longo de extensas distâncias de dispersão, através de uma gama de insetos polinizadores generalistas, incluindo formigas, mariposas, vespas, besouros e abelhas (Millar *et al.* 2014). Apesar da limitada distribuição de < 40 km² e do substancial fluxo gênico, foi detectada uma estrutura genética significativa em *A. woodmaniorum*. Enquanto houve fluxo gênico suficiente para manter uma “conectividade adaptativa”, houve uma diferenciação significativa através de diferentes maciços de topo e entre diferentes populações no mesmo maciço (Millar *et al.* 2013). Uma relação quadrática entre diferenciação gênica e distância geográfica sugeriu que a limitação ao fluxo gênico ocorreu há cerca de 740 m (Millar *et al.* 2013). Um fluxo gênico significativo e altos níveis de exogamia são características importantes para a persistência e conservação desta espécie em uma série de populações disjuntas grandes e pequenas ao longo de uma faixa geográfica estreita. Enquanto este sistema populacional permanecer intacto, é provável que esta espécie persista, mesmo que em populações pequenas, a longo prazo (Millar *et al.* 2013).

Diversos estudos filogenéticos e filogeográficos têm sido feitos sobre invertebrados e vertebrados endêmicos da FFB da Austrália Ocidental, e eles mostram divisões filogenéticas profundas e antigas entre grupos populacionais dentro das espécies definidas atualmente (veja a próxima seção). No entanto, apenas um estudo até hoje combinou investigações filogeográficas com uma estrutura genética em uma escala mais fina dentro de uma espécie. O milípede *Atelomastix bamfordii* é restrito às mesmas cinco faixas adjacentes da FFB (Nistelberger *et al.* 2014) onde as diferentes espécies de *Tetradlea* sem folhas ocorrem (Butcher *et al.* 2007). Um estudo genético sobre o milípede através destas faixas revelou uma forte estruturação filogeográfica com base no DNA mitocondrial e forte diferenciação com base em microssatélites nucleares, além

da falta de correlação entre divergência genética e distância geográfica. Isto sugere que houve pouco ou nenhum contato entre as populações após a sua separação, enfatizando o papel da deriva genética na diferenciação populacional (Nistelberger *et al.* 2014).

Padrões e processos evolutivos

Os padrões florísticos observados nas FFBs do Pilbara e Yilgarn são surpreendentemente semelhantes, apesar de os climas serem altamente contrastantes e as paisagens terem poucos táxons em comum. Ambos os crátons são dominados por floras de zonas áridas com famílias dominantes muito semelhantes (as diferenças mais importantes são que as Malvaceae são mais comuns no Pilbara e as Chenopodiaceae são mais comuns no Yilgarn), e formas de vida perenes tornaram-se mais dominantes no Pilbara.

A análise da diversidade beta em espécies de plantas perenes sugeriu que, embora a taxa de substituição de espécies seja alta, é mais baixa no Pilbara que no Yilgarn. Isto pode estar relacionado simplesmente à amostragem mais restrita a áreas de topo no Pilbara, em vez de incluírem toda a sequência catenária dos maciços, como foi feito no Yilgarn. Similarmente, a falta de sucesso na modelagem de riqueza e composição de espécies no Pilbara pode estar relacionada à amostragem, mas também pode refletir estimativas climáticas piores (devido à falta de estações climáticas) e a natureza mais contígua das FFBs no Pilbara.

Os padrões de riqueza de plantas especialistas da FFB no Pilbara são em grande parte causados pela altitude, mas este fator não foi identificado como importante nos maciços mais moderados do Yilgarn. A razão para o número muito mais alto de especialistas encontrado no Pilbara (66 vs. 44 no Yilgarn) pode ser devido a uma área de FFB muito maior, embora a proporção de espécies endêmicas da FFB seja menor (30.3% no Pilbara vs. 58.3% no Yilgarn). A alta taxa de substituição de espécies registrada nas FFB no Yilgarn, e agora no Pilbara, devem refletir em parte a idade destas paisagens.

Estudos filogenéticos sobre a fauna e flora também sugerem que o padrão de diversidade visto nas FFBs, e mais generalizadamente através da zona árida australiana, está intimamente ligado a sua antiga idade geológica, ao longo da qual esta paisagem evoluiu, e às vicissitudes pelas quais passou (Byrne *et al.* 2008). A aridificação da Austrália começou no meio do Mioceno (15 Ma) quando um ambiente de floresta tropical quente começou a secar, com um período de aumento de aridez e instabilidade regional com intensa erosão através da paisagem durante o final do Mioceno (10-6 Ma). Condições métricas mais quentes retornaram no início do Plioceno (6-2.5 Ma). Então, houve uma progressiva expansão da zona árida e formação dos desertos rochosos há cerca de 4-2 Ma (Fujioka *et al.* 2005). Oscilações climáticas consistentes com os ciclos glaciais começaram durante o Plioceno, mas foram acentuadas a partir do meio do Pleistoceno (~1Ma), com a formação dos sistemas de dunas móveis há cerca de 1 Ma, quando os ciclos climáticos aumentaram em amplitude de 40 para 100 mil anos (Byrne *et al.* 2008; Fujioka *et al.* 2009). Hipotetiza-se que as FFBs do Yilgarn, Pilbara e os maciços de Kimberley e da Austrália

Central podem ter proporcionado refúgio méxico para a biota diante do aumento da aridez (Byrne *et al.* 2008), e a formação de vastos sistemas de dunas do interior da Austrália deve ter aumentado o isolamento destas áreas. Estas FFBs têm funcionado como ilhas terrestres e o isolamento a longo prazo tem levado à divergência filogenética mesmo entre FFBs geograficamente próximas, e também dentro de estruturas de FFBs através de cavidades naturais, que funcionalmente podem ser consideradas ilhas subterrâneas (veja Harrison *et al.* 2014).

Pouca informação filogenética está disponível sobre espécies de plantas endêmicas da FFBs ou sobre espécies intimamente associadas às FFBs. Estudos morfológicos e filogenéticos sobre táxons de *Tetratheca* sugerem que a diversificação ocorreu com a aridificação no Mioceno (6-7 Ma), com a evolução independente de linhagens separadas dentre as espécies endêmicas sem folhas da FFB em faixas adjacentes (Crayn *et al.* 2006, Butcher *et al.* 2007). Apesar de não ser uma espécie especialista da FFB, estudos de reconstrução filogenética e paleodistribuição dos táxons do complexo *Callitris columellaris* indicam que múltiplas linhagens evoluíram nos planaltos regionais, como as FFBs do Yilgarn e do Pilbara. Acredita-se que este complexo de espécies de *Callitris* tenha persistido em antigos refúgios ao longo de múltiplos ciclos climáticos durante o final do Pleistoceno (Sakaguchi *et al.* 2014). Padrões filogenéticos similares são provavelmente encontrados em vários táxons e gêneros com distribuição amplamente disjunta, por exemplo entre o Pilbara e os Maciços Centrais (*Hibbertia glaberrima*, Dilleniaceae; *Eucalyptus lucens* (Myrtaceae), o Pilbara e o sul da Austrália (*Eucalyptus ewartiana*) e o Pilbara e o norte e/ou leste da Austrália (*Astrotricha*, Araliaceae; *Pleurocarpaea*, Asteraceae; *Maytenus* Celastraceae).

Mais dados filogenéticos estão disponíveis para a fauna e também apontam para uma contínua evolução que se iniciou durante a aridificação do Mioceno, com padrões temporais sobrepostos relacionados ao isolamento e à persistência. Uma análise filogenética de esquizomídeos troglóbios mostrou múltiplos clados subterrâneos aninhados com linhagens da superfície, mostrando que provavelmente houve múltiplas invasões de cavidades subterrâneas por ancestrais da superfície, que persistiram nestes locais, e sugerindo também uma dependência de múltiplos refúgios localizados através de diversos ciclos glaciais (Harrison *et al.* 2014). Padrões semelhantes foram relatados para a fauna estigobionte, cuja radiação acredita-se ter ocorrido entre 3-9 Ma nos besouros mergulhadores (Leys *et al.* 2008) e entre 4.1-13.4 Ma nos anfípodas (Cooper *et al.* 2007). Padrões de divergência mais recentes são evidentes no milípede *Atelomastix bamfordii*, com a persistência e o isolamento na FFB resultando em significativa divergência genética entre populações estimada em torno de 0,7 – 1,1 Ma no Pleistoceno (Nistelberger *et al.* 2014). Novamente estas descobertas são consistentes com o conhecido aumento da aridez ocorrido naquela época (Byrne *et al.* 2008).

Padrões mais complexos estão evidentes no lagarto *Lucasium stenodactylum*. A divisão inicial entre as linhagens Pilbara e não-Pilbara são datadas de 16-27 Ma, no início do Mioceno. As linhagens atuais do Pilbara são mais jovens (3-4.5 Ma) e têm preferências por diferentes substratos. Idades intraclados são estimadas em 0,8-2,4 Ma e batem com o aumento da aridez que levou à formação de lençóis de areia móveis, mostrando também isolamento por distância a escalas de < 90 km (Pepper *et al.* 2008). Outros Gekkota mostram o *imprinting* genômico da

mudança climática do Terciário, com linhagens divergentes também intimamente correlacionadas com características geológicas e topográficas, tanto em grande escala geográfica como também em pequena escala dentro da FFB. O lagarto *Heteronotia* mostra uma separação Kimberley versus Pilbara – Maciços Centrais australianos de cerca de 4,2 Ma, seguida por uma separação entre os Maciços Centrais e o Pilbara em 2,9 Ma (e talvez mais antiga), precedendo a formação do sistema de dunas de areia (Pepper *et al.* 2011). Em geral, os padrões do complexo evolutivo e a alta diversidade dos táxons de Gekkota no Pilbara sugerem que as FFBs do Pilbara e planaltos associados foram importantes locais para a persistência destes grupos durante o Plioceno e o Pleistoceno (Byrne *et al.*, 2008; Pepper *et al.*, 2008, 2011; Oliver e Bauer 2011), com divergências evolutivas causadas também por processos vicariantes associados a diferenças regionais de *habitats* (Pepper *et al.* 2013).

Outros grupos de répteis, como os lagartos das famílias Scincidae (Rabosky *et al.*, 2007) e Agamidae (Hugall *et al.*, 2008) e as serpentes da família Typhlopidae (Marin *et al.* 2013) mostram padrões semelhantes aos Gekkota, com estudos filogenéticos descobrindo que a diversificação foi concomitante com a expansão de ambientes abertos e áridos desde o Mioceno, com múltiplas invasões (< 10 Ma) da zona árida seguida por radiação recente (< 5 Ma). Em todos estes casos, planaltos rochosos como a FFB do Pilbara funcionaram como ilhas terrestres com estabilidade climática, permitindo a persistência e facilitando a diversificação e divergência *in situ* entre linhagens mesmo através de distâncias relativamente curtas.

Estes padrões de profundas divisões filogenéticas, distribuições fragmentadas, alta diversidade beta e histórico baixo fluxo gênico identificados no Pilbara e Yilgarn também podem ser encontrados na flora altamente diversa do sudoeste da Austrália, e provavelmente resultaram da natureza antiga destas paisagens e de sua evolução através de milhões de anos de mudanças climáticas, que não foi experimentada pela biota das paisagens jovens no hemisfério norte (Coates 2000; Hopper 2009). O *imprinting* genômico de ciclos climáticos históricos está evidente em muitos táxons do sudoeste (Byrne 2008), incluindo endemismos comuns e raros de afloramentos graníticos que teriam atuado como refúgios localizados do Pleistoceno similares às FFBs (Byrne e Hopper 2008; Tapper *et al.* 2014a, 2014b). A evolução da flora e fauna da FFB, embora restrita pela geologia, foi resultado tanto de um longo estresse ambiental como de processos estocásticos que não ficaram restritos a estes sistemas (Yates & Ladd 2010; Hopper 2009).

Mineração

A mina mais antiga na Austrália, que precede o estabelecimento europeu, ocorre na FFB do Yilgarn. No Maciço de Weld, em Wilgie Mia, ocre vermelho e amarelo foi minerado em grandes quantidades pelo povo aborígene, talvez por vários milênios. Davidson (1952) acredita que a maior parte do ocre vermelho usado nos desertos do oeste veio desta mina, que era relativamente grande (50–100 pés de largura e 65 pés de profundidade), e foi laboriosamente escavada com uma tecnologia muito simples, com muitos túneis seguindo os veios de ocre. Este pigmento era tido

em muito valorizado tanto para propósitos cerimoniais como para o uso em locais de arte rupestre. Ellis (1982) considerou que o depósito se formou do desgaste de uma grande lente de jaspilito. O local foi minerado por europeus entre 1945 e 1978, e hoje é protegido em uma reserva legalmente estabelecida e representada na Lista do Patrimônio Nacional.

Em tempos mais recentes, a demanda mundial por minério de ferro passou por um imenso aumento devido à demanda da China, sendo o Brasil, China e Austrália os mais importantes produtores. A produção australiana de minério de ferro é centralizada em grandes minas da FFB a céu aberto no Pilbara. Em 2012, a Austrália produziu 520 Mt de minério, das quais 94% vieram da Austrália Ocidental, sendo a maior parte vinda do Pilbara (92%) (Armitage 2013; Department of Mines & Petroleum 2013). A maior parte do minério produzido atualmente é hematita, embora a exploração maciça de recursos de magnetita tenha apenas começado, devido a serem muito maiores os custos de processamento. A mineração no Pilbara e Yilgarn é muito diferente em termos de escala, sendo os depósitos no Yilgarn pequenos e espalhados (até 25 Mt), comparados a minas muito maiores (até 1.8 Gt) no Pilbara (Government of Western Australia 2007, Morris & Keenshaw 2011). As operações do Pilbara têm economias de escala muito maiores comparadas ao Yilgarn (Tabela 2, Figura 11).

Tabela 2 - Estatísticas de mineração para a produção de minério em 2012 na Austrália Ocidental. A maior parte da produção do minério de ferro é centralizada em grandes minas a céu aberto no Pilbara. Os números do emprego se referem ao emprego direto por empresas mineradoras (Department of Mines & Petroleum 2013).

	Minas	Produção (Mt)	Produção (%)	\$AU (milhão)	Emprego
Kimberley	3	5,7	1,2	607	917
Yilgarn	8	17,3	3,6	1.851	2.366
Pilbara	28	453,2	95,2	48.563	26.730
Total	39	476,2	100	51.021	30.013

Na Austrália, os direitos de mineração pertencem à Coroa e quase toda a geologia da FFB no Pilbara e Yilgarn está sob arrendamentos de exploração expedidos pelo Departamento de Minas e Petróleo da Austrália Ocidental. Quando uma empresa provou o valor de um recurso e deseja candidatar-se a um contrato de arrendamento de mineração, submete uma Proposta de Mineração ao Departamento de Minas e Petróleo, que avalia o requerimento para o encaminhamento à análise ambiental baseado em um teste de significância sobre a natureza, escala e duração do impacto, importância do ambiente, disponibilidade de processos alternativos para gerenciar os impactos e grau de interesse público. Propostas que são consideradas ambientalmente significativas de acordo com estas diretrizes são encaminhadas à Autoridade de Proteção Ambiental (em inglês, Environmental Protection Authority -EPA) para a avaliação dos impactos. O Gabinete da Autoridade de Proteção Ambiental então estabelece um nível de avaliação para o projeto, baseado na importância de impactos potenciais. Para grandes propostas

de desenvolvimento, o nível de avaliação é normalmente estabelecido através de uma avaliação abrangente conhecida como Revisão Ambiental Pública (em inglês Public Environmental Review - PER). Em consulta com a empresa, é desenvolvido um documento de especificação da proposta para uma análise de impacto ambiental, que é realizado nos termos da Parte IV da Lei de Proteção Ambiental de 1986, de acordo com um conjunto de procedimentos publicados (Environmental Impact Assessment [Part IV Division 1 and 2] Administrative Procedures 2012). Estes procedimentos incluem requisitos para consultar acionistas, fornecer informação suficiente para permitir a inclusão de observações fundamentadas, avaliar opções e alternativas, identificar fatores ambientais que possivelmente serão impactados, identificar os melhores métodos práticos para evitar, quando possível, ou pelo menos minimizar, retificar, reduzir, monitorar e gerenciar os impactos da proposta.

Quando a Revisão Ambiental Pública é finalizada, ela é aberta a audiências públicas por geralmente 4 semanas, durante as quais o público em geral e outras agências governamentais podem fazer apresentações à Autoridade de Proteção Ambiental. A Autoridade de Proteção Ambiental é uma autoridade independente indicada pelo governo para fornecer conselhos sobre uma série de assuntos ambientais. Ao final do período de audiências públicas, a Autoridade de Proteção Ambiental prepara um relatório público e apresenta suas recomendações ao Ministro do Meio Ambiente. Este relatório e as recomendações são, então, abertas a apelo público, e o resultado deste processo é determinado pelo Ministro do Meio Ambiente. O Ministro do Meio Ambiente avalia o relatório da Autoridade de Proteção Ambiental e quaisquer apelos, e determina, em consulta com outros ministros, se a proposta deve ser autorizada a prosseguir e, caso seja, sob quais condições.

As condições impostas ao empreendimento geralmente incluem a abordagem de questões como: proposta de implementação, limite de tempo para a implementação da proposta, relatórios de conformidade e disponibilidade pública de informações pós-avaliação, além de qualquer comprometimento de gerenciamento ambiental feito na Proposta de Mineração. Também podem-se aplicar condições de implementação específicas para a proposta. Geralmente estas condições de implementação são baseadas nos resultados da avaliação e podem incluir provisões para “compensações”, para enfrentar quaisquer efeitos residuais significativos, a fim de atingir “nenhuma perda líquida” de biodiversidade (EPA 2013). Condições de compensação só são impostas depois que as oportunidades de mitigação com classificação mais alta na hierarquia (prevenir/evitar; minimizar/reduzir; resgatar/relocar; reparar/restaurar) forem consideradas insatisfatórias para reduzir os impactos ambientais residuais em conformidade com a política de compensação da Autoridade de Proteção Ambiental.

Projetos de pequena escala, que provavelmente não apresentam um significativo impacto ambiental, não são avaliados pela Autoridade de Proteção Ambiental, mas podem ser avaliados através das condições da *Lei de Mineração* de 1978 e da Parte V, Divisão 2 da *Lei de Proteção Ambiental* de 1986 que relata sobre Desmatamento de Vegetação Nativa. A agência ambiental do Governo Federal também pode-se envolver se a proposta tiver um provável impacto em uma Questão de Importância Ambiental Nacional (em inglês Matter of National Environmental

Significance - MNES) como foi definido pela *Lei de Proteção Ambiental e Conservação da Biodiversidade de 1999*.

Apesar de as empresas gastarem consideráveis recursos, desenvolvendo um parecer detalhado dos impactos do seu empreendimento sobre a flora e fauna das áreas nas quais estão trabalhando, frequentemente falta a compreensão de padrões em uma escala maior na biota, geralmente devido à informação biológica inadequada nessas áreas, tornando difícil aplicar o conhecimento novo em um contexto regional. A fim de proporcionar este contexto regional, os governos da Austrália Ocidental e Federal, em colaboração com algumas das mais importantes empresas de mineração, financiaram vários levantamentos regionais, tanto através de uma gama de diferentes grupos de plantas e animais (McKenzie *et al.* 2009) como concentrados em um específico grupo biótico (Gibson *et al.* 2012). Na falta deste nível regional de informação, têm havido casos em que a avaliação das propostas de desenvolvimento têm sido atrasadas para que estudos biológicos adicionais sejam feitos (SMH 2007; Majer 2009; Piper 2009).

Questões de Conservação

Revisões recentes enfatizam mudanças na biota do Pilbara devido ao uso pastoril, mudanças nas práticas de queimada aborígenes e mineração ao longo dos últimos 150 anos (Woinarski *et al.* 2000; McKenzie *et al.* 2009). Durante este período, alterações fundamentais ocorreram nos padrões de vegetação, sobretudo nos solos aluviais mais ricos e nas assembleias de fauna, em grande parte como resultado do pastoreio excessivo, de incêndios muito frequentes e da introdução de animais ferais e plantas exóticas. Cerca de 15% da mastofauna está extinta atualmente, e preocupantes ervas daninhas, como o capim *Cenchrus ciliaris*, continuam a se alastrar e representam uma séria ameaça à biota nativa. Embora a pecuária não se tenha espalhado em áreas onde as FFB são prevalentes no Yilgarn, o colapso na mastofauna tornou-se comum através da zona árida (McKenzie *et al.* 2007).

Apesar da dimensão do setor de mineração ser pequena, comparada a outros setores como a pecuária, a complexidade da flora e fauna desta paisagem antiga, com táxons endêmicos e crípticos de distribuição geográfica pequena, e táxons com uma diferenciação genética significativa ao longo de curtas distâncias geográficas, juntamente com a alta diversidade beta da flora como um todo, inevitavelmente resulta em difíceis decisões sobre o uso da terra. Áreas de geologia incomuns podem, naturalmente, abrigar biotas incomuns. As profundas divisões genéticas vistas tanto na fauna quanto na flora, através de curtas distâncias geográficas, sugerem que espécie pode não ser a mais apropriada unidade de biodiversidade para acessar impactos potenciais de propostas de mineração. Grupos de populações que representam linhagem evolutivas discretas, e até mesmo populações geneticamente divergentes, podem ser unidades mais apropriadas para a conservação (*cf.* Moritz 1994; Coates, 2000).

No Yilgarn, foram feitas tentativas de atingir um entendimento estratégico das áreas de mais alto valor de conservação (Government of Western Australia 2007) a fim de indicá-las para

a conservação. A EPA (2013) mostrou grande preocupação sobre os impactos cumulativos dos desenvolvimentos nas FFB do Yilgarn, no sentido de alcançar um equilíbrio entre a conservação e o desenvolvimento, e mencionou que nenhum maciço da FFB está protegido em reservas de conservação seguras (classe 'A' ou Parque Nacional) no Yilgarn.

A condição de reserva da FFB no Pilbara é significativamente melhor que no Yilgarn, já que o Parque Nacional Karijini (627.422 ha) cobre um extenso segmento do Maciço de Hamersley, incorporando a escarpa norte, os planaltos e vários sistemas de desfiladeiros, e cobre uma gama significativa de tipos de vegetação (Figura 4, 7a&b). Embora este parque forneça proteção a diversos tipos de vegetação, não representa toda a FFB do Pilbara, devido à alta taxa de substituição de espécies através desta paisagem.

A grande escala das minas a céu aberto no Pilbara, os solos antigos depauperados e o clima árido fazem da restauração um assunto importante. Estima-se que 1.200 km² tenham sido minerados nos últimos 20 anos e precisarão ser restaurados (EPA 2013). Nas suas diretrizes de avaliação, a Autoridade de Proteção Ambiental (EPA) mencionou que a melhor prática de restauração frequentemente restaura uma proporção baixa dos valores da biodiversidade que existia antes da mineração, e para conseguir melhores resultados de restauração ao longo da Austrália Ocidental, serão necessários investimentos em pesquisa e desenvolvimento de tecnologia.

No Yilgarn, apenas um sistema da FFB está em um Parque de Conservação (Classe C), e vários outros estão em antigos arrendamentos pastoris adquiridos pelo Departamento de Parques e Vida Silvestre e gerenciados para conservação; no entanto, estes arrendamentos não excluem mineração. Dado o atual arrendamento da terra e a alta diversidade beta destas faixas, Gibson *et al.* (2012) sugeriram que a prioridade da gestão da conservação deva ser baseada nos padrões de espécies especialistas da FFB que destacam áreas onde importantes processos evolutivos se manifestam. Infelizmente, estas são as mesmas áreas identificadas com o maior potencial para mineração.

No Pilbara, a área de grande coocorrência de especialistas da FFB está parcialmente coberta pelo Parque Nacional Karijini, que garante proteção parcial desta área (Figura 3). Foi feito um progresso significativo através do estabelecimento de prioridades de gestão na escala da paisagem para a flora e fauna ameaçadas no Pilbara, embora sua completa implementação vá demandar recursos substanciais (Carwardine *et al.* 2014). No entanto, projetos de gestão na escala da paisagem já começaram (por exemplo, os Corredores do Pilbara) e as condições recentes para compensar impactos do desenvolvimento de novas minas estão permitindo uma abordagem mais estratégica para tratar de certos processos que ameaçam algumas áreas. Além disso, a articulação dos valores de biodiversidade nas FFB do Pilbara deve ficar mais evidente através de uma avaliação estratégica dos impactos ambientais cumulativos de um plano de 50 anos para a mineração do minério de ferro no Pilbara, que está sendo preparada pela empresa BHP Billiton Iron Ore.

Além dos processos na escala da paisagem descritos acima, há também uma preocupação significativa em relação à probabilidade de uma translocação bem sucedida, ou reintrodução, após a mineração, de algumas espécies endêmicas da FFB, cujo *habitat* primário é um imenso afloramento da FFB. As mudanças no formato da paisagem incorridas após a mineração tornam

altamente improvável que estas espécies endêmicas possam ser reintroduzidas, dados os seus requisitos muito específicos de *habitat* e seus padrões demográficos (Yates *et al.* 2011).

Embora o Governo tenha financiado inventários biológicos regionais (McKenzie *et al.* 2009; Gibson *et al.* 2012), os inventários locais detalhados feitos por proponentes e estudos genéticos associados podem fornecer os dados biológicos necessários para tomar decisões fundamentadas sobre o uso da terra. No entanto, encontrar um equilíbrio entre os interesses do desenvolvimento e da conservação será um desafio nessas paisagens antigas, dada a longa história evolutiva que elas abrigam.

Agradecimentos

Este artigo é dedicado à Kieran McNamara (1954-2013), que foi diretor geral do Departamento de Meio Ambiente e Conservação e dedicou sua vida à conservação da Austrália Ocidental; sob a sua administração foram feitos os levantamentos das FFBs de Yilgarn e Pilbara. Somos gratos à Margaret Byrne por suas críticas construtivas a uma versão anterior deste artigo. Imagens adicionais foram fornecidas por J. McRae, Bennnelongia Consultores Ambientais; S. Grein, Fortescue Metals Group; A. Markey, S. Dillon, and K. Thiele, Departamento de Parques e Vida Silvestre.